



Etude des mécanismes de défaillance du contact électrique dans un micro-interrupteur en technologie MEMS

Vincent Maxime

► To cite this version:

Vincent Maxime. Etude des mécanismes de défaillance du contact électrique dans un micro-interrupteur en technologie MEMS. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010. Français. NNT : . tel-00535811

HAL Id: tel-00535811

<https://theses.hal.science/tel-00535811>

Submitted on 4 Jan 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mme Elisabeth DUFOUR-GERGAM	, Rapporteur et Présidente du Jury
Mme Isabelle DUFOUR	, Rapporteur
M. Robert PLANA	, Examinateur
M. Jérôme DELAMARE	, Directeur de thèse
M. Christophe POULAIN	, Co-encadrant
M. Frédéric HOUZE	, Co-encadrant
M. Laurent CHIESI	, Invité
M. Stephen W. ROWE	, Invité

Remerciements

Mes trois années de thèse ont été quelque peu agitées, et ces remerciements sont alors l'occasion de retracer la petite histoire de ma thèse tout en remerciant les personnes rencontrées à chaque étape...

Tout commence chez Schneider Electric, entreprise à l'origine de cette thèse CIFRE. Je remercie donc tout d'abord Laurent Chiesi (Ingénieur de Recherche, Schneider Electric) qui m'a encadré efficacement durant ces trois années d'aventure doctorale. Ses conseils m'ont été précieux et sans son aide vous ne seriez sûrement pas en train de lire ces remerciements. Viennent ensuite les membres de l'équipe MEMS de Schneider Electric : Sylvain Paineau le manager du groupe, Alfredo Samperio le chef de projet, Amalia Garnier, Benoit Grappe, Caroline Coutier, Christophe Lapierre, Jean-Christophe Fourier et Michel Trouillon ; sans oublier les membres de l'équipe du côté CEA-Leti : Christelle Dieppedale, Henri Sibuet et Stéphan Borel.

Je remercie tout particulièrement Patrick Rousset pour son super travail de conception mécanique, le chapitre 3 en témoignera. Je remercie aussi Thierry Musset pour ses conseils en thermique, ainsi que ses collègues de l'équipe simulation. Je remercie aussi Laurent Carbone qui m'a bien fait rigoler, ainsi que sa machine PVD qui n'a malheureusement pas survécu longtemps à mes manip.

Après moult remaniements organisationnels, l'équipe MEMS est dissoute et me voilà dans le groupe Advanced Process and Materials dont je remercie les membres : Marijo Francillon la responsable de groupe, Brigitte Ohl, Cécile Venet, José Desforges et Yoann. Je remercie ensuite Juan Aymami qui a su m'aiguiller correctement quand j'étais perdu et dont j'ai apprécié la vision du monde de la recherche « corporate ». Et enfin, un grand merci à Stephen W. Rowe (Expert, Schneider Electric) aux conseils toujours avisés et qui m'a permis de réellement avancer scientifiquement durant cette thèse ; le chapitre 4 étant le résultat des nombreuses discussions que nous avons pu avoir. Mais le temps passé chez Schneider n'aurait pas été aussi agréable sans la fine équipe de stagiaires, jeunes embauchés (ou moins jeunes) : Amandine, Feu, Hyunsun, Lahib, Lucile, Manu, Marie, Mélissa et Nico.

Une thèse CIFRE ne peut se faire sans un laboratoire de recherche et un directeur de thèse, c'est ainsi que le Laboratoire de Génie Electrique de Paris (LGEP) arrive dans cette petite histoire. Je remercie alors Frédéric Houzé (Chargé de Recherche, CNRS) pour son encadrement tout au long de ces trois années de thèse, encadrement qui n'a pas défailli malgré les péripéties. Je remercie aussi Sophie Noël, habituée des conférences Holm pour m'avoir pris sous son aile lors de ma première Holm. Je remercie Michèle, ma très sympathique collègue de bureau lors des séjours que j'ai pu effectuer au labo.

C'est durant l'été 2008 que, suite à une divergence d'opinion entre Schneider Electric et le CNRS concernant la propriété intellectuelle, un nouveau laboratoire arrive dans l'histoire de ma thèse : le CEA-Leti, et plus précisément le Laboratoire de Caractérisation et Fiabilité des Microsystèmes (LCFM) dirigé par Didier Bloch que je remercie de m'avoir accueilli. Me voici alors à plein temps au CEA, dans une nouvelle équipe de travail fort sympathique. Je remercie tout d'abord Christophe Poulain (Ingénieur Chercheur, CEA)

qui m'a extrêmement bien encadré durant cette seconde partie de thèse. Sans lui je n'aurais sûrement pas pu finir ma thèse dans de si bonnes conditions, je n'aurais peut-être même pas fini ma thèse. Je remercie alors toute l'équipe du LCFM : Adam, Alexandra, Antoine, le gros David, Delphine, Denis, Estelle (et Sandrine !), Frédéric, Gérard, Marcel, Patrick, Philippe, Pierre, Romain, Thibault et Trang, ainsi que l'équipe de Gardanne : Brice, Pierre-Yves et Vincent. Je remercie aussi Denis Mariolle et Nicolas Chevalier de la plateforme de nano-caractérisation, sans qui les manips du chapitre 4 n'auraient pu avoir lieu. Leur expertise sur l'AFM m'a été précieuse. Je remercie aussi Lise, pour les dépôts de matériaux à la PTA et surtout pour les bonnes rigolades lors de ma seconde Holm (merci Christophe aussi –encore–, ainsi que Mélissa et Avril).

Et en même temps que le LCFM arrivait dans cette petite histoire, surgit Jérôme Delamare (Professeur, Grenoble INP), et devint mon nouveau directeur de thèse. Je le remercie d'avoir accepté de m'encadrer pendant cette seconde partie de thèse, et un grand merci pour son efficacité et sa constante bonne humeur !

Puis un jour est arrivée l'heure de la rédaction (aie !). 240 pages plus tard, arrive l'heure de l'envoi aux rapporteurs, rapporteurs que je remercie du temps qu'ils ont pris pour relire ce manuscrit et de leur participation à ma soutenance : Mesdames Isabelle Dufour (Professeur, Université Bordeaux 1) et Elisabeth Dufour-Gergam (Professeur, Faculté des Sciences d'Orsay, Université Paris-Sud 11), ainsi que Monsieur Robert Plana (Professeur, Université Paul Sabatier, Toulouse 3), qui a accepté d'être examinateur mais qui n'a malheureusement pu assister à la soutenance.

Et enfin un merci à tous les amis, ceux de toujours et ceux rencontrés pendant la thèse : Bart, Bertan, Dimitri, Fred et Elise, Hedi, Fou et Doudette, Flo et Sab, Guitou, Isa C., Isa G., Laurent, Lio, Luc, Majdou, Mathieu, Marlène, Mr Ronchon, Patricia, Raph, Sarah, Simon, Séverin, Thibault, Trystan, Yann, tout le PPCrew et tous ceux que j'ai pu oublier (envoyez-moi un mail pour vous plaindre, je vous rajouterai :-)).

Et pour finir, un grand merci à ma famille qui a toujours été là pour moi, ainsi qu'à Sophie.

The most exciting phrase to hear in science, the one that heralds new discoveries, is not 'Eureka!' (I found it!) but rather, 'hmm.... that's funny...'

La phrase la plus excitante à entendre en science, celle qui annonce de nouvelles découvertes, n'est pas «Eureka» (j'ai trouvé!), mais plutôt «Tiens, c'est marrant...»

Isaac Asimov

Sommaire

Chapitre 1

Introduction et état de l'art.....	10
1. Les micro-interrupteurs MEMS.....	13
1.1. Avantages par rapport aux technologies existantes	13
1.2. Aperçu du marché actuel des interrupteurs MEMS	14
1.2.1. Le micro-relais électrostatique RadantMEMS	16
1.2.2. Le micro-relais électrostatique Omron.....	17
1.2.3. Le micro-relais électromagnétique Magfusion.....	18
1.3. Limitations des interrupteurs MEMS.....	19
2. Le micro-contact électrique.....	20
2.1. Le contact électrique	20
2.2. Physique propre au micro-contact	21
2.3. Modèles de résistance d'un micro-contact	22
2.3.1. Déformation des aspérités.....	23
2.3.2. Modes de conduction	26
2.3.3. Etude des forces et surfaces de contact.....	31
2.4. Défaillances dans les micro-relais.....	35
2.4.1. Collage des contacts	36
2.4.2. Transferts de matière	38
2.4.3. Contamination des surfaces.....	40
2.4.4. Matage mécanique des surfaces	41
2.5. Tentatives d'amélioration de la fiabilité.....	43
3. Le micro-interrupteur Schneider Electric / CEA-Leti.....	48
3.1. Principe de fonctionnement	48
3.2. Connexions électriques	50
3.3. Packaging	50
3.4. Le contact électrique	51
3.4.1. Calcul de la force de contact	52
3.4.2. Caractérisation de la résistance de contact	53
4. Conclusions du chapitre et perspectives	56

Chapitre 2

Endurance du contact électrique sur le micro-interrupteur Schneider/Leti	58
1. Procédure expérimentale	61
2. Tests d'endurance mécanique	64
2.1. Contacts en or.....	64
2.2. Contacts en ruthénium	66
3. Tests d'endurance sous 5V/1mA.....	70
3.1. Contacts en or.....	71
3.1.1. Mise en évidence des modes de défaillances	71
3.1.2. Transferts de matière	72
3.1.3. Croissance d' <i>hillocks</i>	73
3.1.4. Apparition de contamination carbonée	78
3.1.5. Apparition des défaillances	80
3.1.6. Différence entre les deux polarités	82
3.1.7. Nettoyage des surfaces de contact	82
3.2. Contacts en ruthénium	84
4. Tests d'endurance sous 3V / 10µA	87
5. Tests d'endurance sous 14V /10mA	90
6. Tests d'endurance en température.....	92
7. Bilan des modes de défaillance observés	94
8. Conclusions du chapitre.....	96

Chapitre 3

Développement d'un banc dédié à évaluer l'endurance de nouveaux matériaux de contact..... 98

1. Etat de l'art	100
2. Cahier des charges	102
3. Conception du banc de test.....	103
3.1. Véhicules de test	103
3.2. Actionnement	105
3.3. Application de la force de contact.....	105
3.4. Conception mécanique du banc.....	108
3.5. Instrumentation et pilotage.....	111
4. Caractérisation et qualification du banc	113
4.1. Véhicules de test	114
4.2. Capteur de force	115
4.3. Sensibilité du dispositif	117
4.4. Comportement en cyclage.....	118
4.5. Evaluation de la force d'impact	119
4.6. Qualification finale du banc	120
5. Application à l'évaluation du tungstène.....	122
5.1. Mesure de la résistance de contact en fonction de la force	124
5.2. Tests d'endurance.....	125
6. Conclusions et perspectives	128

Chapitre 4

Emission électronique et transfert de matière à l'échelle nanométrique 130

1. Etat de l'art	132
1.1. L'évaporation sous champ (<i>field evaporation</i>)	134
1.2. L'électromigration	134
1.3. Le transfert fin	134
1.4. L'arc électrique.....	135
1.4.1. Arc à l'ouverture	136
1.4.2. Arc à la fermeture	138
2. Mesures directes sur le micro-interrupteur	141
2.1. Montage expérimental	142
2.2. Mesures en conditions d'arc	142
2.3. Mesures à 5V / 1mA.....	144
2.4. Mesures à 14V / 10mA	145
2.5. Conclusions partielles	146
3. Développement d'un banc de test dédié	147
3.1. Cahier des charges.....	147
3.2. L'AFM à pointe conductrice.....	148
3.3. Leviers AFM	150
3.4. Instrumentation.....	153
3.5. Echantillons.....	155
4. Validation du banc de test	156
4.1. Observation d'un cycle de commutation du contact	156
4.2. Enchaînement des commutations : cyclage	157
4.2.1. Levier AFM polarisé négativement (cathode).....	159
4.2.2. Levier AFM polarisé positivement (anode)	160
5. Etude de la phase de fermeture du contact	162
5.1. Mise en évidence d'une émission électronique par effet de champ.....	163
5.1.1. Mesures sur le banc de test	163
5.1.2. Validation des mesures à l'oscilloscope	165
5.1.3. Théorie	165
5.2. Comparaison des matériaux	169
5.3. Influence de l'atmosphère	175
5.4. Influence de la vitesse d'actionnement	179
5.5. Phénomènes anodiques	180
5.6. Evaporation du matériau anodique.....	185

5.7.	Mécanisme de transfert	189
5.8.	Retour sur la cinétique du mécanisme de transfert	190
5.9.	Comparaison avec un arc sous vide (<i>vacuum arc</i>)	191
6.	Etude de la phase d'ouverture du contact	194
6.1.	Mise en évidence d'un éventuel pont fondu	194
6.2.	Conséquences sur la dégradation du contact	197
6.3.	Emission électronique lors de la phase d'ouverture.....	198
7.	Conclusions	198
8.	Retour sur le micro-interrupteur	200
Conclusions et perspectives		204
1.	Fiabilisation à 3V/5V	206
2.	Fiabilisation à 14V	207
3.	Et en conditions d'arc électrique ?.....	210
4.	Et en RF ?.....	211
5.	Et finalement	211
Références		214
Publications durant la thèse		225
Annexe 1 – Mesures au vibromètre laser à effet Doppler sur le micro-interrupteur.....		226
1.	Principe de la mesure.....	226
2.	Montage expérimental.....	227
3.	Actionnement du micro-interrupteur	227
4.	Mesures temporelles	228
5.	Intégration des mesures.....	229
6.	Extraction du temps de commutation	230
Annexe 2 – Calcul de la force de contact dans le micro-interrupteur		232
1.	Perméabilité apparente	232
2.	Moment magnétique de la membrane	235
3.	Calcul du couple magnétique dans la membrane.....	236
4.	Calcul de la force de contact	237

Chapitre 1

Introduction et état de l'art

Dès la fin des années 60, l'utilisation des procédés de l'industrie des semi-conducteurs a ouvert la voie à la miniaturisation de systèmes mécaniques jusqu'alors inimaginables. Le premier MEMS (pour *Micro Electro Mechanical System*) restait très proche des dispositifs qui l'ont engendré : il s'agissait d'un simple transistor, mais celui-ci avait la particularité d'être doté d'une grille mobile résonante [Nathanson1967]. De nos jours les dispositifs MEMS sont légion et représentent un marché de plusieurs milliards de dollars couvrant les domaines de l'électronique grand public au spatial en passant par différents secteurs industriels allant de l'automobile au médical. Il existe alors autant de MEMS différents qu'il existe d'applications, la Figure 1 ci-dessous en témoigne.

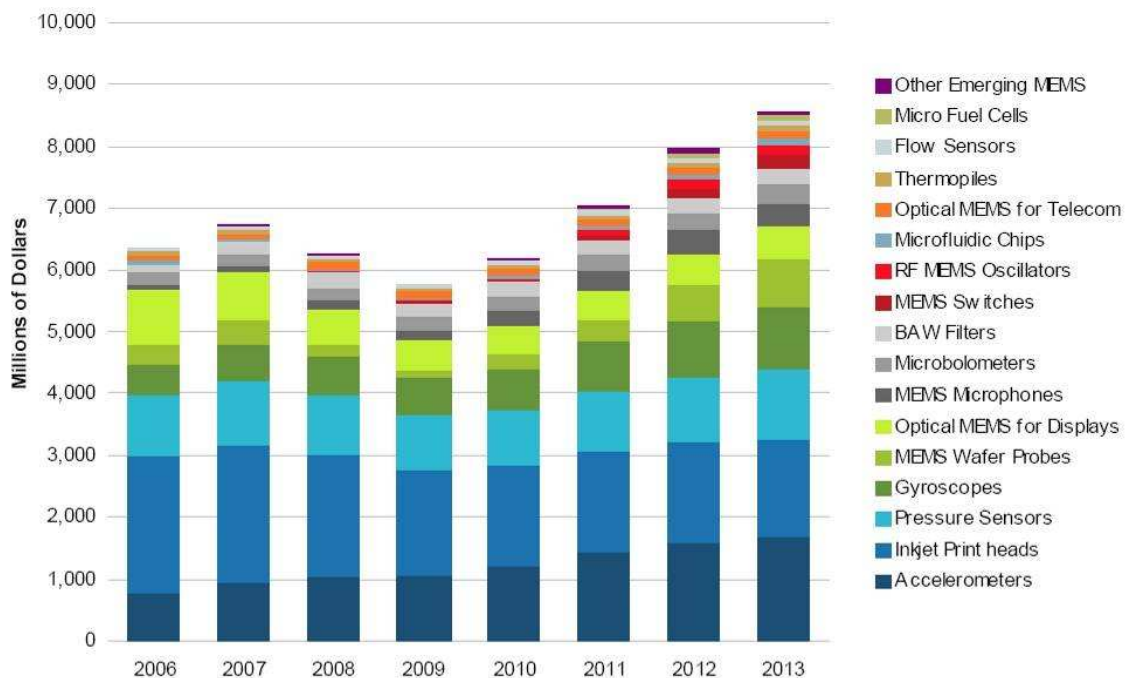


Figure 1. Aperçu du marché des MEMS en avril 2009. [iSuppli2009]

Malgré la grande variété de MEMS existants, les accéléromètres, les têtes d'impression jet d'encre et les capteurs de pression représentent à eux seuls plus de la moitié des composants MEMS vendus dans le monde. Une telle constatation s'explique par la difficulté à produire des MEMS fiables, difficulté liée à la présence de parties mobiles. Le silicium et les matériaux exotiques de la microélectronique n'avaient en effet jamais été sollicités mécaniquement avant l'apparition de telles mécaniques micrométriques. Les mécanismes de défaillance sont alors complexes et mettent en jeu des phénomènes souvent nouveaux, inconnus de l'industrie des semi-conducteurs. L'exemple le plus parlant dans ce domaine est probablement le DMD (Digital Micromirror Device) développé par Texas Instruments et qui a permis entre autres la miniaturisation extrême des vidéoprojecteurs. Le premier prototype a été conçu en 1987, mais la commercialisation d'un dispositif fiable possédant une durée de vie suffisante pour une application grand public n'a été possible qu'à partir de 2002 [Douglass2003]. Quinze années se sont donc écoulées et la majorité des défis qui ont été relevés étaient liés à des problèmes de fiabilité du composant. Nous allons voir que les micro-interrupteurs MEMS ne font pas exception à la règle, et un important travail sur la fiabilité de ces dispositifs reste à faire.

1. Les micro-interrupteurs MEMS

A l'instar de son homologue macroscopique que nous connaissons tous, un micro-interrupteur permet d'établir et d'interrompre un courant. Il est simplement de taille microscopique et présente de ce fait de nombreux avantages que nous aborderons dans un paragraphe suivant. La première publication d'un tel dispositif date de 1979 [Petersen1979]. L'article décrit un cantilever (poutre) en SiO_2 doté d'un actionnement électrostatique et muni de contacts en or. La résistance de contact mesurée est de 5Ω . Le document conclut sur les perspectives prometteuses offertes par un tel dispositif, ainsi que sur les problèmes à résoudre quant à sa fiabilité. L'auteur émet aussi quelques doutes sur les capacités d'un micro-interrupteur à interrompre des courants, et exprime le sentiment que ce composant est plutôt destiné à des applications de commutation de petits signaux, ou nécessitant une isolation galvanique.

Nous allons voir que 30 ans après, les performances et la fiabilité des micro-interrupteurs MEMS restent limitées et les applications auxquelles se destinent ces dispositifs sont bien celles qu'avait imaginées K.E. Petersen.

1.1. Avantages par rapport aux technologies existantes

La miniaturisation d'un interrupteur permet, bien évidemment, de réduire le volume occupé par le dispositif, mais ce n'est pas le principal intérêt. Cette réduction de taille passe par une fabrication en technologie silicium, et permet donc une co-intégration avec des circuits intégrés, mais surtout une production de volume à un prix considérablement réduit. La fabrication d'interrupteurs en technologie MEMS permet alors de concurrencer les relais reed et les relais électromécaniques tant d'un point de vue encombrement que prix. Un autre avantage par rapport à ces deux technologies est une vitesse de commutation accrue et une intégration plus aisée surtout vis-à-vis d'un interrupteur reed, très fragile.

Les interrupteurs statiques (SSR pour *Solid State Relays*), également fabriqués grâce à la mise en œuvre de technologies silicium sont de sérieux concurrents pour le relais MEMS. Ils présentent un encombrement également réduit, un coût de fabrication similaire et une vitesse de commutation plus élevée. Le principe de fonctionnement d'un tel composant lui confère à la fois ses qualités et ses défauts. En effet, aucune pièce mécanique n'est en mouvement, ce qui le rend extrêmement fiable. Mais l'absence de séparation physique entre la partie commande et la partie puissance ne permet pas d'avoir d'isolation galvanique.

L'interrupteur MEMS se présente alors comme un concurrent à toutes ces technologies (cf. Tableau 1). Il combine en effet les avantages du relais mécanique et du relais statique : petit, peu cher, rapide, une isolation galvanique et un comportement linéaire. Il peut de plus mémoriser un état (bistable), ce qui est impossible pour un relais statique. Sa technologie de fabrication permet, de plus, d'envisager une multitude d'architectures (actionnement magnétique, électrostatique, thermique, bistable...) et une éventuelle co-intégration avec des circuits intégrés, des filtres, ou tout autre composant réalisé en technologie silicium.

	MEMS	Reed	Electromécanique	Semiconducteur
Volume (mm ³)	< 10	~ 100	~ 300	< 10
Résistance à l'état fermé	1 Ω	100 m Ω	50 m Ω	10 m Ω
Isolation galvanique	oui	oui	oui	non
Temps de commutation	μ s	ms	ms	ns
Linéarité	oui	oui	oui	non
Consommation	Très faible	Moyenne	Moyenne	Très faible
Endurance	?	Moyenne	Moyenne	Excellente
Prix	Faible	Moyen	Moyen	Faible

Tableau 1. Comparaison des performances entre les différentes technologies de relais.

Cependant pour qu'un tel dispositif soit viable, il se doit d'offrir des performances au moins équivalentes à celles des technologies existantes, et surtout démontrer sa fiabilité. Nous allons voir que, pour l'instant, cette dernière condition n'est pas remplie, ce qui constitue le principal point faible de cette technologie. Un aperçu du marché actuel des interrupteurs MEMS mettra en évidence cette problématique.

1.2. Aperçu du marché actuel des interrupteurs MEMS

Depuis le premier interrupteur MEMS, de nombreux composants ont vu le jour, de nombreuses startups et entreprises se sont lancées dans la course. C'est le milieu des années 90 qui a vu naître les premiers projets d'interrupteurs MEMS, principalement pour des applications militaires ou spatiales. L'engouement grimpe à son paroxysme en 2003 lorsque les premières versions commerciales sont proposées par Magfusion, Teravicta et RadantMEMS. Malheureusement Magfusion fait faillite mi-2004, Teravicta début 2008. Parmi les précurseurs, seul RadantMEMS reste encore dans la course. La Figure 2 ci-après est la « courbe de tendance » des interrupteurs MEMS proposée par le cabinet de conseil en stratégie WTC.

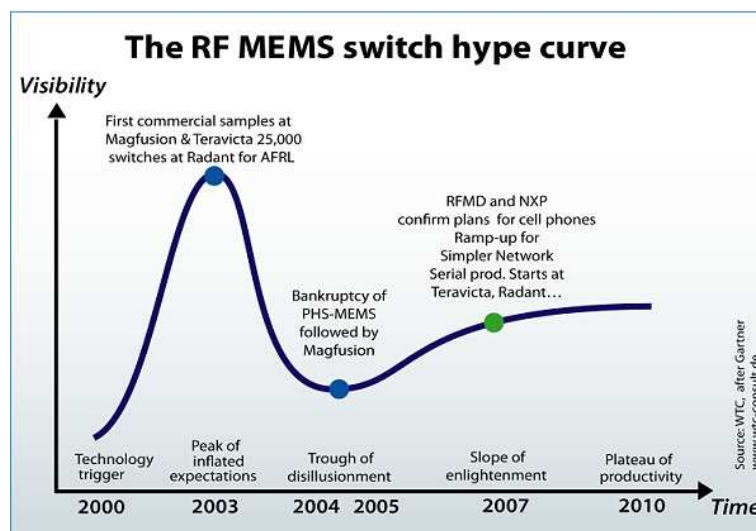


Figure 2. Courbe de tendance des micro-relais MEMS. [WTC2007]

Une telle courbe est caractéristique de l'introduction d'une nouvelle technologie. Passé le pic de surenchère initial, peu de concurrents restent en lice et une période de désillusion apparaît. WTC prévoyait en 2007 une période d'éclaircissement suivi d'un plateau de

production en 2010. Si nous sommes réellement entrés dans cette période de production, les interrupteurs MEMS resteront alors un marché de niche : le marché actuel n'est que de 10 millions de dollars US annuels [iSuppli2009a]. Cependant, de nouvelles startups proposant des relais MEMS voient le jour régulièrement et des programmes de développement sont lancés dans de grands groupes, augurant un marché en pleine expansion (iSuppli table sur un marché de 160 millions de dollars US en 2013). Le tableau suivant présente les fabricants d'interrupteurs MEMS toujours en lice mi-2009 (Tableau 2).

	Application	Production
Asulab [Gueissaz2001]	Médical	300,000
Advantest [Liu2001]	Equipement de test automatisé (ATE)	150,000
MEMSCAP [Elger2004]	Médical	20,000
Omron [Komura1999, Seki2006, Uno2009]	ATE	Faible
Panasonic	ATE	Faible
RadantMEMS [Majumder2003, Lampen2004, Maciel2004]	Militaire / Civil	Faible
WiSpry [Morris2003, Yang2008, Brown2008]	Téléphonie mobile	Faible
HT micro	Militaire	Faible
XCOM wireless	Militaire / ATE	N/A
MEMtronics [Goldsmith1998, Palego2009]	Défense	N/A
Protron, MultusMEMS	Encore au stade de R&D	
Fujitsu, Toshiba, Mitsubishi, Freescale, ADI, Alps, OKI, Raytheon, Rockwell, EADS, Maxim, DelfMEMS, Baolab Microsystems	En développement	

Tableau 2. Fabricants de micro-relais en juin 2009. (Adapté de [iSuppli2009a])

A cette multitude d'entreprises viennent s'ajouter de nombreuses universités travaillant sur le sujet, même si le nombre de projets dans ce domaine a été réduit depuis 2003. Nous ne passerons pas en revue l'ensemble des micro-interrupteurs existants ou ayant existé. Pour cela, l'ouvrage de G. Rebeiz reste une référence dans le domaine et décrit notamment les travaux des pionniers [Rebeiz2003]. Pour présenter la technologie des interrupteurs MEMS, nous allons, dans les paragraphes suivants, étudier plus en détail trois composants à contact ohmique¹ : les micro-interrupteurs développés par RadantMEMS, Omron et Magfusion.

¹ Deux types de micro-interrupteurs existent : à contact ohmique et à contact capacitif. Un dispositif à contact capacitif n'est utilisable qu'en RF. Il exploite le fait qu'à haute fréquence une capacité présente une impédance proche de zéro. Utilisé en courant continu un tel composant ne permet pas de laisser passer le signal, il ne nous intéresse donc pas.

1.2.1. Le micro-relais électrostatique RadantMEMS

Ce micro-relais a été initialement développé à la Northeastern University (Boston, USA) dès 1997 [Zavracky1997], puis en collaboration avec Analog Devices avant d'être récupéré par Radant Technologies dont dépend maintenant RadantMEMS [Majumder2003]. Grâce à un programme de la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, initié en 2002, visant à améliorer la fiabilité des relais MEMS, le dispositif présente actuellement la meilleure durée de vie du marché [Goldsmith2007]. Le micro-relais est composé d'un cantilever en or de 7-9 μm d'épaisseur actionné grâce à une électrode inférieure (noté « gate » sur la Figure 3 - a). Une tension de 60-80 V est nécessaire pour actionner le dispositif. Le double contact métallique est recouvert d'un matériau du groupe platine, sans plus de précisions. L'originalité de la conception réside dans le fait que le cantilever, très rigide, ne vient jamais en contact avec l'électrode d'actuation. Aucun matériau diélectrique d'isolation n'est donc nécessaire, ce qui permet de limiter grandement l'apparition de charges résiduelles à l'interface électrode d'actuation / cantilever, à l'origine de défauts d'ouverture. Un tel phénomène est habituellement la cause principale de défaillance des micro-relais électrostatiques, nous le verrons plus loin.

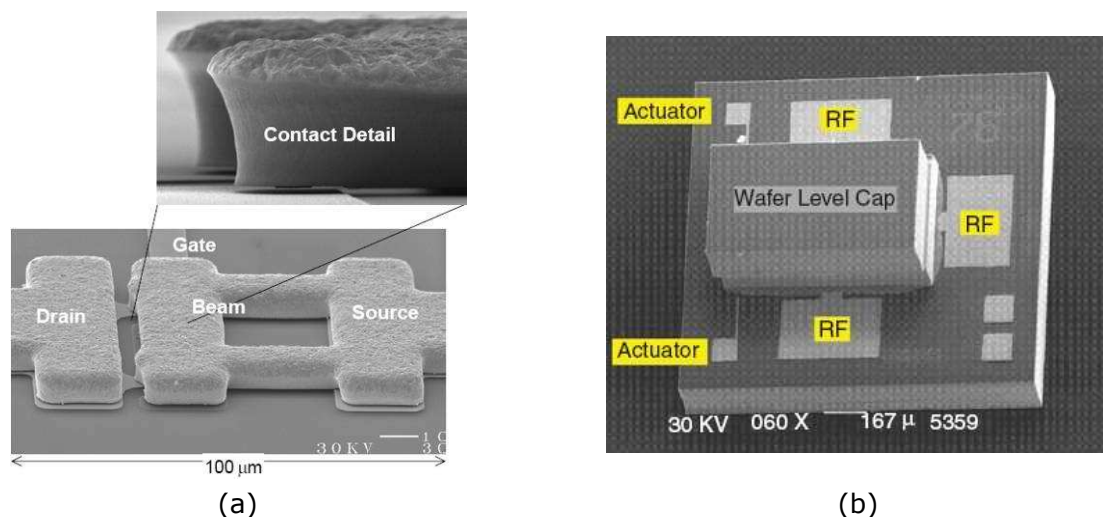


Figure 3. Le micro-relais développé par RadantMEMS.

(a) Observation MEB de la structure et des contacts. (b) Le dispositif une fois encapsulé. [Majumder2003]

Le relais, mesurant $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$, est protégé par un capot en silicium scellé grâce à un cordon en verre fritté et opère sous azote (cf. Figure 3 - b). La résistance de contact initiale est de l'ordre de l'ohm, avec une force de contact de $100 \mu\text{N}$ par contact. Des versions multi-contacts (jusqu'à 64) ont aussi été réalisées pour augmenter le courant maximal admissible et réduire la résistance de contact. D'un point de vue endurance le composant est capable de réaliser plus de 400 milliards de cycles sous une puissance RF à 10GHz de 0,5W [Goldsmith2007].

Ces résultats paraissent impressionnants et nous pouvons légitimement nous demander pourquoi un tel composant ne connaît pas le succès qu'il mérite. Ces performances correspondent cependant à des tests en « cold switching », c'est-à-dire que les phases d'actionnement du composant sont réalisées en l'absence de signal. Les phases de fermeture et d'ouverture sous courant -les plus dommageables pour le contact- sont

donc soigneusement évitées. Si les mêmes tests sont effectués en « *hot switching* », donc avec un signal appliqué en permanence aux bornes du contact, les résultats sont beaucoup moins bons : dans de telles conditions, le micro-relais se révèle capable de commuter 10^7 fois une charge résistive de 1V/10mA et la durée de vie est limitée par l'érosion du matériau de contact [Lampen2004].

Actuellement le principal client de RadantMEMS est l'industrie militaire américaine, et la production reste donc très faible. La distribution de leurs composants en dehors des Etats-Unis était jusqu'à récemment impossible pour des raisons militaires. Depuis 2009 toutefois cette restriction a été levée, augurant peut-être une production en plus grande série.

1.2.2. Le micro-relais électrostatique Omron

La société Omron (Japon) a développé dès 1999 un micro-relais MEMS à actionnement électrostatique de $2 \times 3 \text{ mm}^2$ [Komura1999]. La fabrication est complexe, un substrat de silicium SOI compose l'actionneur et porte le contact mobile. Ce substrat est tout d'abord scellé sur un substrat de verre portant le contact fixe et l'électrode d'actuation, puis le substrat SOI est aminci. Un second substrat de verre est alors scellé et joue le rôle de packaging, la cavité étant remplie d'azote sous faible pression. La tension d'actionnement est de 34 V et les contacts sont réalisés dans un alliage d'or. De la même façon que pour le composant précédent, le collage électrostatique des électrodes est évité car le dispositif est conçu pour que l'électrode supérieure ne puisse à aucun moment venir en contact avec l'électrode d'actuation. Pour y parvenir le contact est légèrement plus épais que l'électrode d'actionnement et des butées sont réalisées. La structure est de plus optimisée pour développer une force de rappel importante : 1.5mN (et 5mN de force de contact!).

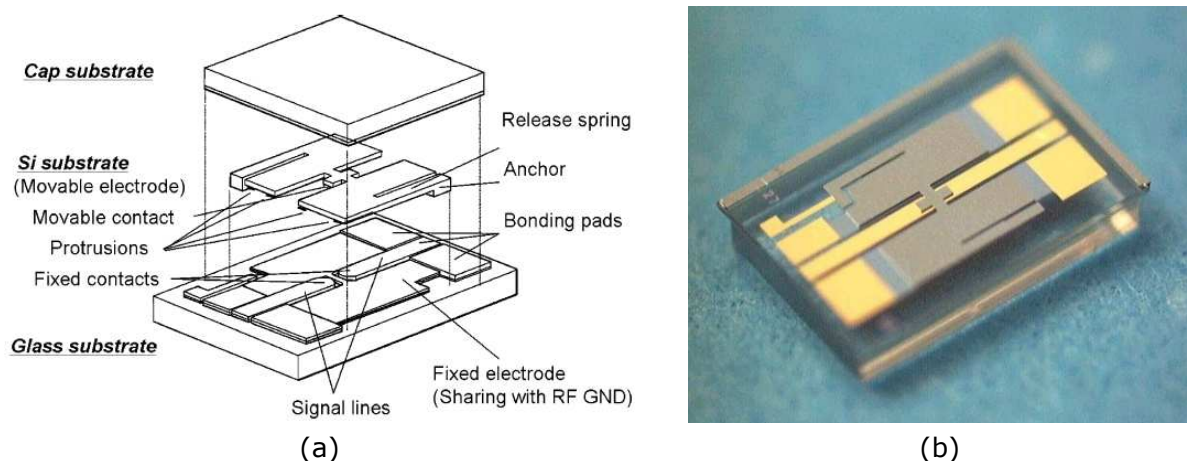


Figure 4. Le micro-relais Omron. (a) Schéma de principe et (b) réalisation. [Seki2006]

Fin 2008 Omron annonce officiellement la commercialisation de ce composant en vue d'application dans des équipements de tests automatisés (ATE) [Omron2008]. La durée de vie du composant a été testée en commutant une charge résistive de 0.5V/0.5mA en *hot switching* et 100 millions de cycles peuvent être réalisés sans aucune défaillance ni dégradation notable de la résistance de contact (200 mΩ initialement). Pour atteindre un marché plus vaste, celui de la téléphonie mobile, un packaging céramique est développé

et une configuration en commutateur de signal est testée en montant deux micro-relais dans le même boîtier ($5.2 \times 3 \text{ mm}^2$) [Uno2009]. Les performances RF ont été évaluées et s'avèrent insuffisantes pour espérer atteindre ce marché.

Il est intéressant de noter que ce composant (entre autres) a contribué à engendrer le pic de surenchère observé sur la courbe de tendance présentée en Figure 2. En 1999 ce composant était en effet annoncé avec une durée de vie de 10 millions de cycles sous 10V/10mA, durée de vie au niveau de l'état de l'art actuel, voire supérieure. Aujourd'hui le composant réalise 100 millions de cycles, certes, mais à un calibre beaucoup plus faible. La surenchère des années 2000 dans le domaine des micro-interrupteurs MEMS est aisément perceptible.

1.2.3. Le micro-relais électromagnétique Magfusion

Né dans les laboratoires de l'Arizona State University (Tempe, USA) en 2000, le micro-relais commercialisé par la startup Magfusion (Microlab à ses débuts) était le composant le plus prometteur de l'époque. Sa production avait été confiée à PHS MEMS, startup grenobloise qui fit faillite quelques mois avant Magfusion. Mais l'histoire n'est pas terminée pour autant, le micro-interrupteur développé par Schneider Electric en partenariat avec le CEA-Leti est une version épurée de ce dispositif, comme nous le verrons dans la 3^{ème} partie de ce chapitre.

L'originalité et l'avantage de ce micro-relais réside dans sa méthode d'actionnement [Ruan2001]. La partie mobile du dispositif est un cantilever ferromagnétique réalisé en FeNi et l'actionnement est assuré par une bobine électromagnétique planaire intégrée sur le substrat. Le cantilever ferromagnétique pivote autour de deux bras de torsion pour ouvrir ou fermer le contact électrique en fonction du sens du courant circulant dans la bobine (cf. Figure 5 - a). Un tel concept permet d'actionner le micro-relais en utilisant seulement 5-6 V et moins de 100 mA. La présence d'un aimant permanent intégré dans le packaging du composant permet d'assurer deux positions stables (ON et OFF) sans nécessiter l'application d'un courant de maintien (cf. Figure 5 - b). Le système est donc bistable et nécessite une tension de commande faible, il se démarque donc largement ses concurrents.

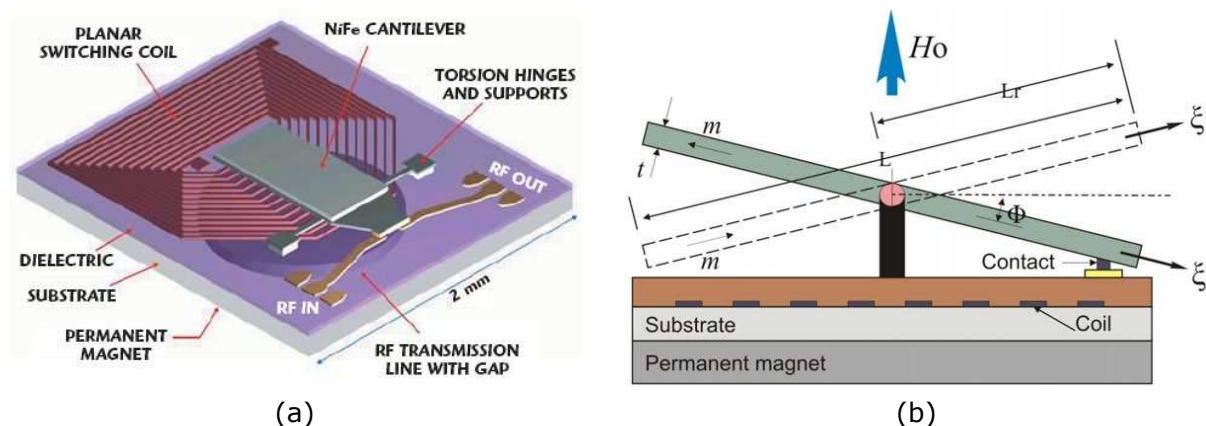


Figure 5. Le micro-relais électromagnétique Magfusion.

(a) Le composant complet. (b) Vue en coupe du principe de fonctionnement. [Ruan2001]

Le composant nu mesure $1.7 \times 2 \text{ mm}^2$ et $5 \times 5 \text{ mm}^2$ une fois packagé. Le dispositif est reporté sur un substrat en céramique équipé de pads de soudure et connecté électriquement par des fils d'or (cf. Figure 6 – a). Un capot en céramique est scellé sous azote pour assurer une atmosphère de fonctionnement optimale au composant et l'aimant permanent est fixé sur ce packaging (cf. Figure 6 – b).

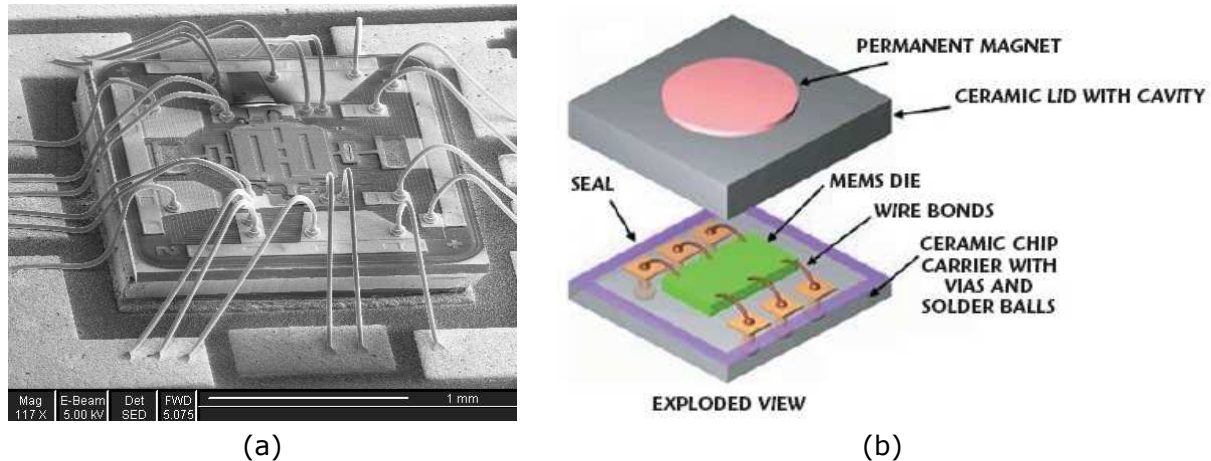


Figure 6. (a) Observation MEB du composant. (b) Composant complet avec son packaging. [Magfusion2004]

Le contact est réalisé en or et la résistance de contact initiale est d'environ 0.5Ω . Des tests d'endurance en *hot switching* avec une charge résistive de $10\text{V}/10\text{mA}$ révèlent une durée de vie d'un million de cycles et de 10 millions en *cold switching* [Magfusion2004]. Ce composant était le plus prometteur de sa génération grâce à sa faible tension d'actionnement et sa bistabilité.

1.3. Limitations des interrupteurs MEMS

Différents problèmes n'ont pas permis l'essor espéré des micro-relais MEMS. Leurs performances RF sont pour l'instant assez limitées, la gamme de fréquence est encore limitée et la linéarité perfectible. En théorie toutefois ces dispositifs présentent des performances RF aussi bonnes que les relais électromécaniques et bien supérieures aux dispositifs semi-conducteurs (FET, diode PiN). Cette limitation sera donc probablement levée dans les années à venir.

Une incertitude de taille subsiste par contre sur la durée de vie de ces composants et surtout sur leur capacité à interrompre et établir des signaux de forte puissance. La longévité d'un tel composant ayant une forte tendance à diminuer proportionnellement à la puissance des signaux commutés, ces deux points sont fortement liés. Nous allons voir que deux phénomènes limitent principalement la durée de vie des relais MEMS : le chargement du diélectrique et la dégradation du contact électrique.

Nous avons vu précédemment que RadantMEMS ou Omron, pour ne citer qu'eux, ont opté pour une architecture dans laquelle la partie mobile du relais n'entre jamais en contact avec l'électrode d'actuation. Si cette astuce n'était pas mise en œuvre, un diélectrique devrait être déposé à l'interface contact mobile / électrode d'actuation pour éviter de court-circuiter le signal d'actionnement. Dans cette situation, la présence du diélectrique engendre un phénomène d'accumulation de charges qui entraîne au fur et à

mesure des cycles un collage permanent des deux électrodes. Ce phénomène est un problème pour les relais MEMS à actionnement électrostatique et fait l'objet de nombreuses études, dont certaines sont menées au CEA-Leti [Koszewski2010]. Nous n'aborderons pas ce problème, d'autant plus que le micro-interrupteur que nous allons étudier possède un actionnement magnétique qui n'est pas sujet à ce type de défaillance.

Les relais MEMS commerciaux ne souffrant pas de problème de chargement de diélectrique ont une durée de vie qui est alors limitée par la dégradation de leur contact électrique. Cette constatation est systématique, et sera étudiée plus en détails dans le paragraphe suivant. Des défaillances de la structure mécanique des dispositifs ne sont jamais constatées, les systèmes mécaniques microscopiques présentant la particularité d'être très peu sensibles à la fatigue [Arzt1998, Douglass1998]. Le tableau suivant présente alors les durées de vie affichées des dispositifs actuellement commercialisés (ou qui l'étaient encore récemment).

	Matériau de contact	Charge DC commutée (<i>hot switching</i>)	Durée de vie (cycles)
Asulab [Gueissaz2001]	Rh	0.5V / 5μA	10 ⁵
Magfusion [Magfusion2004]	Au	10V / 10mA	10 ⁶
Omron [Omron2008]	Alliage Au	0.5V / 0.5mA	10 ⁸
Panasonic	Alliage Au	1.5V / 10mA	10 ⁷
RadantMEMS [Lampen2004]	Groupe Pt	1V / 10mA	10 ⁷
Teravicta [McKillop2006]	Au	1V / 1mA	10 ⁶

Tableau 3. Comparaison de la durée de vie des micro-relais commerciaux.

Nous nous intéressons uniquement aux performances obtenues lors de la commutation sous courant continu (*hot switching*) de charges résistives, le *cold switching* ne fait pas l'objet de notre étude. Il convient de noter que les résultats publiés relatifs à la commutation de signaux RF de puissance comparable à ces charges résistives présentent des durées de vie souvent supérieures. Teravicta par exemple annonçait une endurance d'un million de cycles sous 1V/1mA, mais cent millions de cycles lors de la commutation d'une puissance RF de 1mW.

Tous les micro-relais présentés dans le tableau 3 possèdent une durée de vie limitée uniquement par la dégradation de leur contact électrique. Dans certains cas la valeur de la résistance de contact augmente au cours de l'utilisation du composant, jusqu'à atteindre des valeurs excessives. Dans d'autres cas les deux contacts se collent définitivement lors des tests, le contact ne pouvant plus être rouvert. Ces modes de défaillances vont être étudiés en détails par la suite. Commençons par nous intéresser plus en détail au contact électrique et aux particularités d'un contact électrique à l'échelle micrométrique.

2. Le micro-contact électrique

2.1. Le contact électrique

Par définition un contact électrique consiste à presser l'un contre l'autre deux corps conducteurs pour permettre le passage du courant. Lors de cette mise en contact, seule une fraction de la surface totale des conducteurs va réellement entrer en contact

mécanique, et une fraction encore plus faible de la surface va conduire le courant. Trois types de surfaces existent alors dans un contact électrique. Prenons par exemple le cas d'un contact sphère-plan. Dans un tel modèle un seul des deux membres du contact est supposé rugueux, l'autre membre est parfaitement lisse. La sphère définit une zone de contact circulaire sur le plan, appelée zone de contact apparente (A_a) (cf. Figure 7).

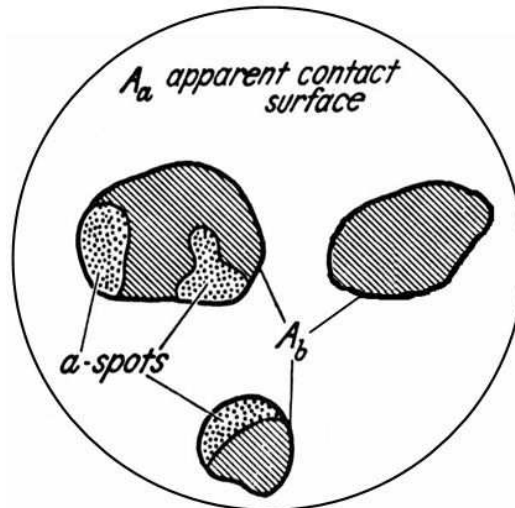


Figure 7. Composition de la surface de contact lors d'un contact sphère-plan (A_a , aire de contact apparente. A_b , aire de contact mécanique. a -spots, aire de contact électrique)

Cependant, la rugosité des matériaux empêche la sphère de toucher en tout point de la surface. La sphère et le plan entrent donc en contact mécanique uniquement sur les aspérités les plus élevées. Cette surface est appelée surface de contact mécanique (*load-bearing surface* en anglais, A_b). La structure physico-chimique de la surface doit également être considérée : bien souvent des films de contamination et/ou d'oxydes sont présents sur les surfaces des matériaux de contact. Il en résulte que seules les zones exemptes de tels films, ou pour lesquelles ces films ont été rompus lors de la mise en contact, appelées *a-spots*, constituent l'aire de contact électrique.

Nous remarquons donc que seule une partie infime du contact permet de réellement conduire le courant. Mécaniquement, si nous négligeons l'éventuel film de contamination, la surface efficace dépend de différents paramètres : la force appliquée, la rugosité des surfaces de contact, la dureté des matériaux de contact et leur module d'Young. Lors de la mise en contact des deux surfaces, les aspérités qui vont supporter la charge appliquée subissent des contraintes importantes et se déforment jusqu'à stabilisation de la surface de contact, il s'agit du fluage.

2.2. Physique propre au micro-contact

La physique du micro-contact, ou la physique du contact dans les micro-relais, est un sujet encore peu exploré. Les publications parues durant les dix dernières années ne reflètent pas un comportement clair, chaque dispositif étudié semblant se comporter d'une façon différente. Les phénomènes semblent pourtant similaires à ceux intervenant à l'échelle macroscopique, mais à l'échelle microscopique certains paramètres prennent une importance insoupçonnée auparavant. Pour comprendre l'origine des différences

entre le contact macroscopique et le micro-contact, le tableau suivant compare les grandeurs importantes relatives à un relais électromécanique de la plus petite taille disponible dans le commerce (ou un interrupteur reed) avec celles caractéristiques d'un micro-relais. Nous verrons ensuite comment ces différents paramètres influent sur la physique du contact électrique.

	Relais MEMS	Relais électromécanique ²
Force de contact	100-500 μN	10,000 μN
Surface de contact effective	$< 1 \mu\text{m}^2$	$10^5 \mu\text{m}^2$
Résistance de contact	500-1000 $\text{m}\Omega$	50-100 $\text{m}\Omega$
Epaisseur du contact	$\leq 1 \mu\text{m}$	100 μm

Tableau 4. Comparatif des caractéristiques principales liées au contact électrique.

Comme nous pouvons le constater, les micro-relais sont de tous points de vue très éloignés des mécanismes macroscopiques dont ils s'inspirent. Les forces de contact mises en jeu sont mille fois plus faibles que dans les systèmes classiques, et les surfaces de contact résultantes sont dix mille fois plus faibles. Dans ces conditions, la surface de contact électrique dans un micro-relais est extrêmement réduite : la force appliquée ne permet pas de déformer de nombreuses aspérités et ne permet pas de rompre un éventuel film de contamination ou une couche d'oxyde. Les effets de surface sont donc prédominants dans la physique du microcontact.

De plus, même si les micro-relais opèrent en général à des courants plus faibles que les relais classiques, les densités de courant engendrées par ces surfaces de contact très réduites peuvent être propices à l'apparition de phénomènes d'électromigration ou d'échauffement local important. Les mécanismes de conduction électrique peuvent aussi être affectés. Si les spots de contact électrique (*a-spots*) sont réduits, de l'ordre du libre parcours moyen des électrons dans les métaux, la conduction n'est plus diffusive mais balistique (cf. paragraphe suivant). De même, si l'épaisseur du matériau de contact est réduite, la résistivité est alors dominée par les collisions entre les électrons, la surface du film et les joints de grains, et non plus par les collisions au sein du matériau. La résistivité est alors plus élevée que pour un matériau massif, et varie en fonction de l'épaisseur du matériau de contact.

Les parties suivantes présentent un état de l'art de l'étude des microcontacts. Nous commencerons par présenter les différents modèles de résistance de contact qui ont été développés et nous détaillerons les particularités que nous venons d'énoncer. Une revue des différents modes de défaillances qui ont été observés dans le domaine des micro-relais sera ensuite présentée.

2.3. Modèles de résistance d'un micro-contact

Les outils développés au cours des dix dernières années pour modéliser la résistance de contact d'un micro-relais s'appuient largement sur l'expérience acquise grâce aux modèles développés pour les contacts macroscopiques. La physique est la même, à l'exception près que la force de contact étant réduite, le contact électrique se fait alors

² De type Tyco Electronics Axicom 4ème génération (10x6x5.65 mm³) [Johler2002].

uniquement sur des aspérités dont la taille est de l'ordre du libre parcours moyen des électrons dans certains cas. Ceci entraîne des modes de conduction propres aux microsystèmes. De plus, cette force réduite ne permet pas de rompre à coup sûr une éventuelle couche de contamination ou d'oxyde et nous allons voir que ceci peut être problématique pour estimer la résistance d'un micro-contact.

Pour évaluer la résistance d'un contact électrique, il convient de connaître deux paramètres de premier ordre : le mode de déformation du matériau de contact et le mode de conduction électrique associé. Etudions alors en détail le modèle de résistance de contact développé par R. Coutu pour évaluer la résistance de contact d'un micro-relais [Coutu2006]. L'intérêt de ce modèle réside dans la large gamme de déformation et de modes de conduction pris en compte. Nous verrons toutefois qu'il comporte quelques lacunes, même s'il a été amélioré récemment [Coutu2009].

2.3.1. Déformation des aspérités

Lorsque deux surfaces sont mises en contact, ce ne sont que quelques aspérités qui se touchent initialement et se déforment. Ceci est d'autant plus vrai que les forces de contact sont faibles. Différents régimes de déformations existent alors : élastique, plastique ou élasto-plastique. Pour une aspérité donnée, le rayon r de l'aire de contact mécanique varie en fonction du régime de déformation (cf. Figure 8). Il est donc nécessaire d'établir la valeur de ce rayon r , pour chacun des régimes de déformation possibles.

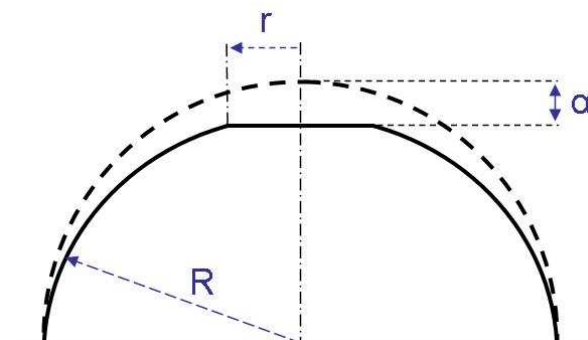


Figure 8. Déformation d'une aspérité de contact hémisphérique de rayon R .

Déformation élastique (Hertz) : lorsque deux surfaces dépourvues de film de contamination ou d'oxyde sont mises en contact avec une force faible, les *a-spots* se déforment élastiquement. L'aire de contact A , circulaire, pour un *a-spot* est alors donnée par l'équation suivante :

$$A = \pi R \alpha \quad (1.1)$$

La force de contact normale, dans ce cas-là, s'exprime suivant le modèle de Hertz [Johnson1987] :

$$F_c = \frac{4}{3} E' \alpha \sqrt{R \alpha} \quad (1.2)$$

Où E' est le module d'Young équivalent provenant de l'expression : $\frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$.

Dans cette expression (E_1, ν_1) et (E_2, ν_2) sont respectivement les modules d'Young et les coefficients de Poisson du matériau du conducteur 1 et 2. Ceci permet de déduire le rayon r du spot de contact considéré :

$$r = \sqrt[3]{\frac{3F_c R}{4E'}} \quad (1.3)$$

Si la force appliquée est élevée, la déformation n'est plus réversible ; et il est admis généralement que passé trois fois la limite élastique du matériau, le régime de déformation purement plastique commence [Johnson1987].

Déformation plastique : pour modéliser la déformation plastique, le modèle d'Abbott & Firestone est utilisé [Abbott1933]. Ce modèle fait l'hypothèse que la force appliquée est assez importante et a été appliquée assez longtemps pour que le fluage des aspérités soit stabilisé. Dans ce cas-là, l'aire de contact d'un *a-spot* est la suivante :

$$A = 2\pi R \alpha \quad (1.4)$$

et la force de contact s'exprime ainsi :

$$F_c = HA \quad (1.5)$$

où H est la dureté Meyer du matériau le plus mou des deux. Ceci permet de déduire le rayon r des aspérités de contact déformées plastiquement :

$$r = \sqrt{\frac{F_c}{H\pi}} \quad (1.6)$$

Lorsque la force appliquée est intermédiaire entre ces deux modèles, la déformation est élasto-plastique. Le modèle CEB (Chang, Etison, Bogy) permet de modéliser un tel comportement [Chang1987].

Déformation élasto-plastique : dans un régime de déformation élasto-plastique, une partie de l'aire de contact est déformée plastiquement, alors que le reste de la zone est déformée élastiquement. Dans ce cas-là, l'aire de contact s'exprime ainsi :

$$A = \pi R \alpha \left(2 - \frac{\alpha_c}{\alpha} \right) \quad (1.7)$$

où α_c est la déformation verticale critique à laquelle commence la déformation plastique,

et qui s'exprime par $\alpha_c = R \left(\frac{K_H H \pi}{2E'} \right)^2$ et où K_H est le coefficient de dureté donné par l'expression : $K_H = 0.454 + 0.41\nu$, avec ν le coefficient de Poisson.

La force de contact s'exprime dans le cas d'une déformation élasto-plastique :

$$F_c = K_H HA \quad (1.8)$$

Cette expression n'est pas satisfaisante, une discontinuité apparaît lors de la transition entre déformation élastique et élasto-plastique. Chang et al. [Chang1997] ont ainsi mis en évidence que la déformation plastique idéale débutait à $3Y$, Y étant la limite élastique, et non pas à $K_y Y$ comme cela était admis auparavant (K_y étant le coefficient d'élasticité du matériau). En utilisant une interpolation linéaire, une modification du modèle CEB a été proposée [Chang1997], et la force de contact pour une déformation élasto-plastique devient :

$$F_c = \left(3 + \left(\frac{2}{3} K_y - 3 \right) \frac{\alpha_c}{\alpha} \right) Y A \quad (1.9)$$

où K_y est égal à : $K_y = 1.1282 + 1.158\nu$

La limite élastique pour la majorité des métaux est relié à leur dureté par la relation $Y = 0.354H$, ce qui permet d'obtenir l'expression de la force de contact :

$$F_c = \left(1.062 + 0.354 \left(\frac{2}{3} K_y - 3 \frac{\alpha_c}{\alpha} \right) \right) H A \quad (1.10)$$

Le rayon r d'une aspérité de contact déformée élasto-plastiquement s'exprime de la façon suivante :

$$r = \sqrt{\frac{F_c}{H \pi \left(1.062 + 0.354 \left(\frac{2}{3} K_y - 3 \left(\frac{\alpha_c}{\alpha} \right) \right) \right)}} \quad (1.11)$$

Comme nous pouvons le voir, force de contact et aire de contact sont intimement liées. Nous avons établi, pour l'instant, le rayon que présente un *a-spot* dans les différents régimes de déformation. Il s'agit maintenant de savoir combien de ces *a-spot* sont mis en contact lors de la fermeture d'un micro-relais.

De nombreux modèles existent, probablement autant qu'il existe de groupes de recherche dans ce domaine. Considérons deux cas, les plus courants : le modèle de *a-spot* multiples (*multiple a-spot*) et le modèle de *a-spot* unique effectif (*single effective a-spot*). Le modèle *multiple a-spot* est basé sur les travaux de Greenwood & Williamson [Greenwood1966] et Abbott & Firestone [Abbott1933]. Les hypothèses sont les suivantes :

- les surfaces de contact rugueuses sont isotropes
- toutes les aspérités de la surface sont sphériques et ont le même rayon de courbure
- la hauteur des aspérités est distribuée aléatoirement
- les aspérités sont indépendantes
- le matériau ne se déforme qu'au niveau des aspérités
- aucun échauffement ne se produit

L'aire de contact totale est alors prise comme la combinaison en parallèle des différents *a-spot*. Le modèle *single effective a-spot* considère, quant à lui, que les aspérités de contact sont proches les unes des autres et interagissent entre elles. Dans ce cas-là, la surface de contact effective est définie comme la somme des différentes aires des *a-spot*

(cf. Figure 9), d'un rayon effectif r_{eff} . Majumder et al. [Majumder2001] ont modélisé le contact de leur micro-relais en utilisant ces deux modèles et ils aboutissent à une résistance de contact plus faible que la pratique en utilisant le modèle *multiple a-spot*, alors qu'ils obtiennent une résistance plus élevée en utilisant le modèle *single effective a-spot*.

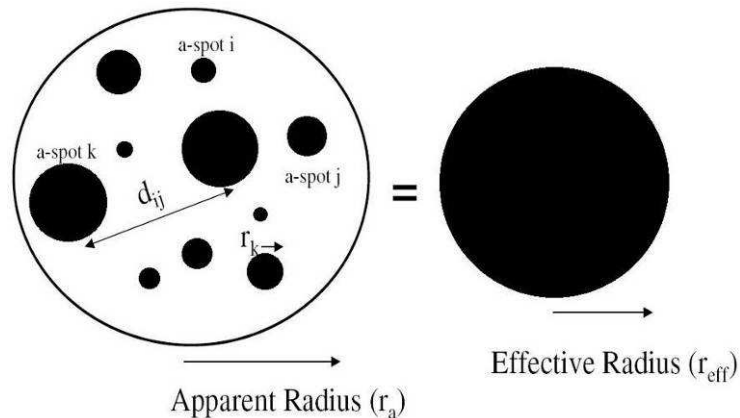


Figure 9. Comparaison des modèles « multiple a-spot » et « effective a-spot ».
[Coutu2006]

Outre la surface de contact réelle, le rayon des spots de contact va déterminer le mode de conduction électrique à travers le contact électrique. En effet, si la taille des spots est inférieure au libre parcours moyen des électrons dans le matériau, la conduction va se faire de façon balistique : les électrons n'interagissent pas du tout avec le réseau cristallin au niveau du spot de contact. Trois cas de figure doivent alors être considérés : le transport balistique, le transport semi-balistique et le transport classique : diffusif. Nous allons voir comment prendre en compte ces différents régimes de conduction.

2.3.2. Modes de conduction

La résistance de contact ($R_{contact}$) telle qu'elle est définie couramment est la somme de deux résistances : la résistance de constriction (R_c) et la résistance (R_f) du film de contaminant ou d'oxyde invariablement présent à la surface de n'importe quel contact. Nous avons donc :

$$R_{contact} = R_c + R_f \quad (1.12)$$

Pour simplifier, nous considérerons pour l'instant que le contact est dépourvu de film superficiel. R_c , par contre est inévitable et est due au fait que les lignes de courant se déforment au niveau des *a-spots*, bien plus petits que la surface totale du contact. Ce resserrement des lignes de courant est à l'origine du terme de résistance de constriction introduit par Holm (cf. Figure 10).

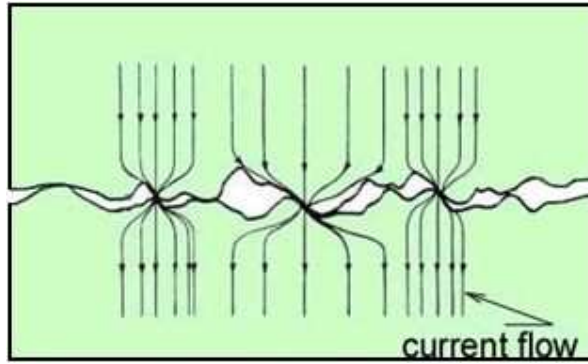


Figure 10. Constriction des lignes de courant au niveau des *a*-spots. [Slade1999]

Conduction diffusive : dans le cas d'une conduction des électrons par diffusion, la résistance de constriction pour un *a*-spot unique s'exprime suivant la théorie de Maxwell, mise en application par Holm [Holm1967] : $R_c = \frac{\rho}{2a}$, où a est le rayon du spot de contact

et ρ la résistivité équivalente des deux matériaux : $\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$.

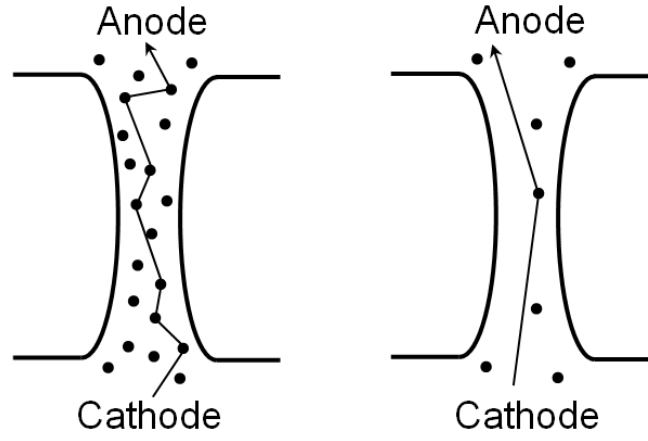
Si nous considérons un modèle de spot unique effectif, a devient r_{eff} et nous pouvons alors établir les équations de la résistance de contact $R_{contact}$ dans le cas d'une déformation élastique :

$$R_{contactDE} = \frac{\rho}{2} \sqrt[3]{\frac{4E'}{3F_c R}} \quad (1.13)$$

et dans le cas d'une déformation plastique :

$$R_{contactDP} = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{H\pi}{F_c}} \quad (1.14)$$

Les forces de contact dans notre cas sont très faibles, pouvant générer des spots de contact de rayon r_{eff} inférieur au libre parcours moyen des électrons l_e . Ce libre parcours moyen est de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres pour la plupart des métaux. Ainsi, si r_{eff} est proche du libre parcours moyen, le transport est quasi-balistique et balistique si r_{eff} est inférieur à l_e . Si r_{eff} est bien supérieur à l_e , la conduction est diffusive, cas que nous venons de traiter. La figure suivante illustre les deux modes de conduction principaux : diffusif et balistique.



(a) Régime diffusif ($R_{eff} > l_e$)

(b) Régime balistique ($R_{eff} << l_e$)

Figure 11. Illustration du transport diffusif et balistique.

Conduction balistique : Dans le cas d'une conduction balistique, une bonne approximation la résistance de contact a été établie par Sharvin [Sharvin1965]:

$$R_s = \frac{4\rho K}{3\pi \cdot r_{eff}} \quad (1.15)$$

où K est le nombre de Knudsen défini par $K = \frac{l_e}{r_{eff}}$.

Conduction quasi-balistique : Dans la zone de conduction quasi-balistique, Wexler a établi une interpolation entre les conductions diffusives et balistiques qui permet d'estimer la résistance de contact, appelée alors résistance de Wexler [Wexler1966]:

$$R_w = \frac{4\rho K}{3\pi \cdot r_{eff}} \left(1 + \frac{3\pi}{8} \Gamma(K) \frac{r_{eff}}{l_e} \right) \quad (1.16)$$

Cette expression est une combinaison de la résistance de Sharvin et de la résistance de constriction établie par Holm. Elle peut alors être mise sous la forme :

$$R_w = R_s + \Gamma(K) R_c \quad (1.17)$$

$\Gamma(K)$ est, dans le modèle de Wexler, une fonction non explicite permettant de pondérer les contributions entre les deux modes de conduction. Plus récemment, Mikrajuddin et al. [Mikrajuddin1999] ont reconsidéré ce problème par une autre approche et ont réussi à établir une expression analytique de $\Gamma(K)$, représentée sur la Figure 12:

$$\Gamma(K) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty e^{-Kx} \frac{\sin x}{x} dx \quad (1.18)$$

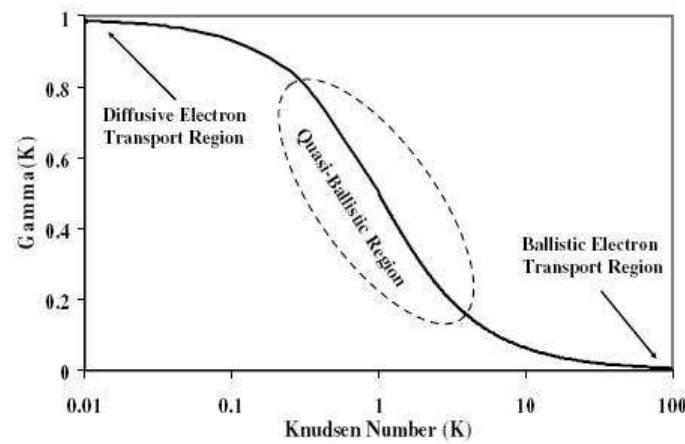


Figure 12. Tracé de la fonction de Wexler d'après les travaux de Mikrajuddin et al. [Coutu2006]

Ces considérations nous permettent d'estimer la résistance de contact d'un micro-relais dans tous les régimes de déformation et de conduction possibles. Nous appliquerons ces modèles au micro-interrupteur que nous allons étudier dans la dernière partie de ce chapitre. Avant cela, étudions les limitations de ce modèle et les améliorations possibles.

Couche de contamination (R_f) : Comme nous l'avons précisé, la contribution d'une éventuelle couche de contamination à la résistance de contact a été négligée. Calculer la résistance de film R_f n'est pas aisé, les films de contaminants étant souvent discontinus et leur résistivité difficile à mesurer. De plus, les forces de contact faibles auxquelles opèrent les micro-relais ne permettent pas de rompre totalement une couche de contamination. Négliger cette contribution est donc difficilement justifiable mais c'est ce qui est fait dans la quasi-totalité des cas. Cette hypothèse est ensuite généralement utilisée pour justifier la différence entre modélisation et mesure, la modélisation fournissant généralement des valeurs plus faibles que la mesure.

Forces d'adhésion : A ces échelles micrométriques, et aux faibles valeurs de force mises en jeu, les interactions à courte distance (attractives) ne sont a priori pas négligeables et peuvent modifier la force de contact réelle. Nous verrons dans le paragraphe qui suit que ces forces sont effectivement non négligeables et mesurables lors de la réouverture d'un micro-contact. D'un point de vue modélisation, Majumder et al. [Majumder2003] ont amélioré leur modèle en prenant en compte ces forces d'adhésion, tout comme Huang et al. [Huang2006] par le biais du modèle JKR (Johnson-Kendall-Roberts).

Effet couche mince : La principale lacune des modèles utilisés jusqu'à maintenant dans le domaine des micro-relais est l'omission de la résistance de constriction liée à l'épaisseur des matériaux de contact utilisés. La Figure 13 illustre ce phénomène : les lignes de courant sont déformées pour passer au travers de la constriction de contact (R_c), mais une déformation supplémentaire a lieu lors du passage dans la couche mince (R_{S-TF}) [Boyer1988, Norberg2006].

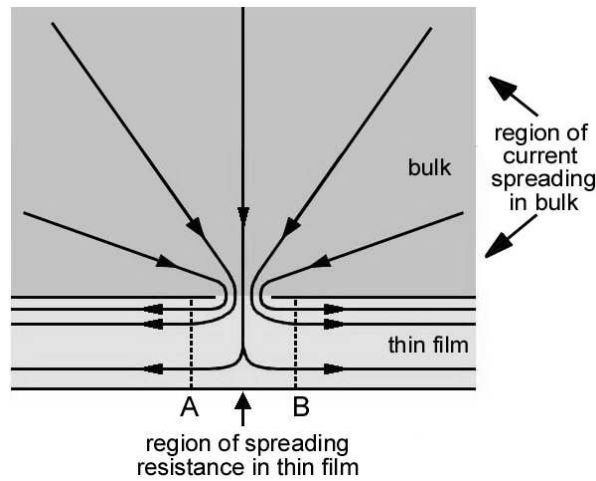


Figure 13. Constriction des lignes de champ à l'interface entre un matériau massif et une couche mince. [Timsit2008]

La théorie développée par Holm fait l'hypothèse que les deux membres du contact sont semi-infinis, hypothèse qui n'est plus valable dans le cas de couches minces. Lorsque le diamètre du spot de contact devient du même ordre de grandeur que l'épaisseur des matériaux de contact, la contribution de R_{S-TF} n'est plus du tout négligeable. Timsit a ainsi calculé que dès que le diamètre du spot de contact est égal à l'épaisseur du film, R_{TF} n'est plus négligeable [Timsit2008], ce qui a été confirmé expérimentalement par Read et al. [Read2009]. L'omission de cette contribution engendre une sous-estimation de la résistance de contact.

Un second phénomène est engendré par l'utilisation de couches minces, en particulier lorsque celles-ci sont déposées sur des substrats durs. Kwon et al. ont mis en évidence une stabilisation de la résistance aux forces élevées ($> 500\mu\text{N}$) [Kwon2008] (cf. Figure 14). Ce phénomène est une conséquence de « l'effet substrat » bien connu dans le domaine de la nanoindentation de couches minces. Lorsqu'une couche mince déposée sur un substrat dur est indentée, sa dureté mesurée augmente avec la profondeur d'indentation à proximité du substrat. C'est pourquoi, pour des mesures de dureté dans de telles conditions, la profondeur d'indentation est alors couramment limitée à 10% de l'épaisseur de la couche.

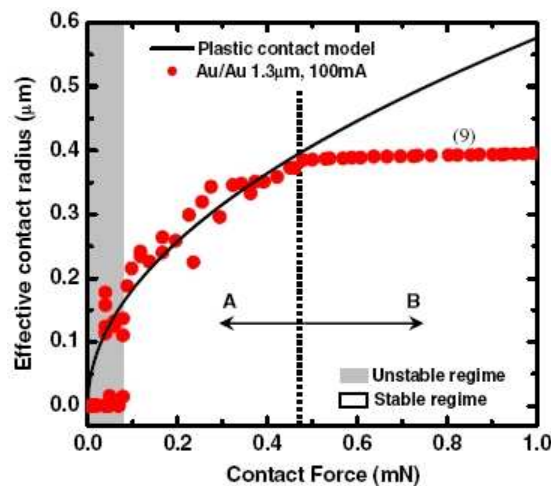


Figure 14. Estimation du rayon de contact pour un contact Au-Au. [Kwon2008]

Coutu a alors tenté d'intégrer les deux effets que nous venons de présenter dans son modèle de résistance de micro-contact [Coutu2009]. Malheureusement sa vérification expérimentale ne confirme pas sa modélisation, différence qu'il attribue à des problèmes de mesure.

Il faut noter aussi que la résistivité électrique varie en fonction de l'épaisseur des matériaux utilisés [Sondheimer1952, Mayadas1968], paramètre rarement pris en compte lors de la modélisation de micro-contacts. Lorsque l'épaisseur des matériaux de contact diminue, la résistivité augmente et est dominée par les chocs des électrons avec la surface du film et les joints de grains. Elle est alors dépendante de l'épaisseur du matériau et du libre parcours moyen des électrons [Zhang2006, Bilhaut2009]. De la même façon la conductivité thermique des matériaux diminue avec leur épaisseur, pouvant engendrer des échauffements beaucoup plus importants que dans des matériaux massifs [Langer1996].

A l'échelle macroscopique un contact électrique n'a pas de dimension verticale, l'interface entre les deux matériaux est considérée comme plate, les forces de contact étant beaucoup plus importantes. A nos échelles la mise en contact de deux aspérités crée un contact qui possède une épaisseur non négligeable (cf. Figure 15). La forme de cette zone de contact est donc proche d'un cylindre de taille nanométrique. Les propriétés des matériaux dans ce cylindre, la résistivité par exemple, diffèrent grandement de celles du reste du matériau. Un nouveau modèle de résistance de contact a alors été proposé par Lau et al., dépoussiérant la théorie classique du contact électrique sans dimension verticale [Lau2009]. La variation des propriétés des matériaux au sein du contact n'a cependant pas été considérée.

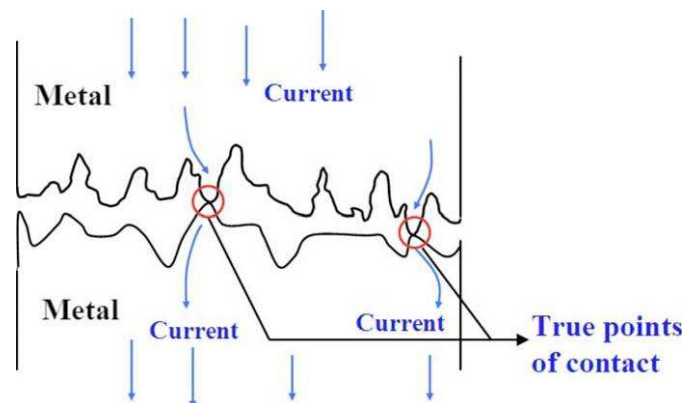


Figure 15. Mise en évidence de la dimension verticale d'un spot de contact à l'échelle nanométrique. [Lau2009]

Modéliser la résistance électrique d'un contact micrométrique n'est donc pas chose aisée et à l'heure actuelle aucun modèle n'est satisfaisant et ne prend en compte la totalité des particularités liées à la réduction d'échelle. Un problème de taille réside dans l'évaluation de la surface de contact en particulier. Nous allons alors nous intéresser à l'étude des forces et des surfaces de contact dans le paragraphe suivant.

2.3.3. Etude des forces et surfaces de contact

La Figure 14 présentée précédemment nous révèle que la mise en contact de deux surfaces d'or avec des forces pourtant faibles (centaines de μN) entraîne des

déformations plastiques. Ce comportement a déjà été observé à plusieurs reprises [Pruitt2004, Patton2005] et montre que le contact microscopique est dominé par le comportement des aspérités de contact qui se plastifient sous l'effet de la pression locale importante. Classiquement, les grains d'or dans une couche d'un micromètre d'épaisseur présentent des dimensions de l'ordre de 100nm de diamètre et de quelques nanomètres de hauteur [Majumder2001, Lory2009]. Nous comprenons alors aisément que les rugosités de contact sont déformées plastiquement, d'autant plus qu'initialement seules quelques rugosités entrent en contact, entre 1 et 50 d'après Majumder, quelques dizaines d'après Rezvanian [Rezvanian2008].

A cette échelle, la forme macroscopique (sphère, plan...) des électrodes n'est pas le paramètre topographique le plus important. Kwon et al. ont ainsi observé que la mise en contact de deux surfaces d'or était très largement dépendante de leur rugosité [Kwon2008]. Ils ont procédé à des mesures de résistance de contact en fonction de la force appliquée avec deux surfaces d'or possédant des rugosités très différentes. Plus la rugosité est importante, plus la force nécessaire à l'obtention d'un contact stable est élevée.

L'étude de la force minimale nécessaire à l'obtention d'un contact stable apparaît alors comme un paramètre important, qui dépend de la dureté du matériau et de sa rugosité. De nombreuses études ont été réalisées sur ce sujet, principalement à l'aide de nanoindenteurs ou d'appareils analogues. Le tableau suivant récapitule une partie de ces études.

	Gamme de force étudiée	Force pour l'obtention d'un contact stable		Force d'adhésion
Hosaka1993	10µN - 1mN	Au Ag Pd	100 µN > 600 µN > 600 µN	Au : 10 µN Ag : 5 µN Pd : 20 µN
Hannoe1996	80µN - 4mN	Au Ag Pd	140 µN 780 µN 2.5 mN	
Hyman1999	10-500 µN	Au	100 µN	
Schimkat1999	100µN - 10mN	Au AuNi ₅ Rh	100 µN 300 µN > 300 µN	0.3-2.7 mN 0-300 µN <100 µN
Bromley2001	0-600 µN	Au	100 µN	
Dickrell2005	0-100 µN	Au vs Pt	100 µN	100µN ou 10µN
Patton2005	20µN - 1mN	Au	100 µN	150 µN
Ma2007	5-200 µN	Au AuNi ₅ Rh	30 µN 30 µN 50 µN	? 5 µN 0 µN
Kwon2007	100µN – 10 mN	Au Au vs Pt Pt	< 100 µN < 100 µN 6 mN	
Kwon2008	10µN – 1mN	Au	70-400 µN	470 µN

Tableau 5. Récapitulatif des différentes études liées aux forces de contact dans les micro-contacts.

Comme nous pouvons le remarquer, certains résultats sont cohérents d'une étude à l'autre alors que d'autres diffèrent largement. La force de contact nécessaire à l'obtention d'un contact électrique stable pour de l'or est dans la majorité des cas de l'ordre de

100 μ N. La Figure 16, obtenue par Hyman et al. est caractéristique de ce résultat. Ceci explique la large utilisation de l'or dans les microcontacts, les forces de contact étant classiquement de l'ordre de plusieurs dizaines de μ N à quelques centaines.

Il est intéressant de noter que les résultats présentés dans le tableau précédent ont été obtenus par différentes équipes, en utilisant différentes méthodes et surtout avec des géométries de contact différentes et souvent très éloignées (bille de plusieurs mm de rayon, aiguille de quelques μ m de rayon de courbure, contacts plans...). Pourtant les résultats varient peu. Ceci confirme ce qui a été dit précédemment : à cette échelle la forme macroscopique des membres du contact compte beaucoup moins que la rugosité de leurs surfaces. Il faut d'ailleurs noter que le seul point commun à toutes ces études est la nature des matériaux de contact : il s'agit toujours de couches minces, élaborées par pulvérisation ou électrodéposition. Leur rugosité est donc toujours du même ordre de grandeur (en règle générale, en l'absence de la mise en œuvre de procédé spécifique visant à modifier la structure du matériau, la rugosité dépend de la taille des grains, la taille des grains dépend de l'épaisseur de la couche).

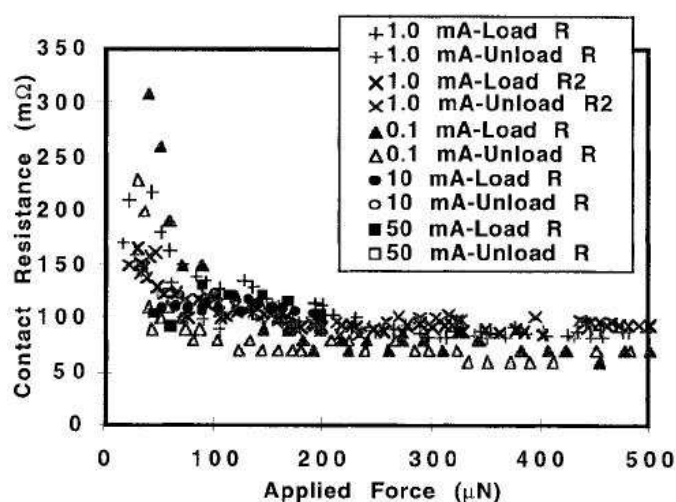


Figure 16. Résistance de contact en fonction de la force de contact pour des contacts en or. [Hyman1999]

Les matériaux les plus durs (Pd, Rh, AuNi₅...) nécessitent des forces de contact plus élevées pour obtenir un contact électrique stable. Ceci est logique, et doit être considéré avec attention lors du choix d'un matériau de contact approprié, la force de contact développée par un micro-relais étant limitée. Une solution consiste alors à déposer simplement une fine couche d'un matériau dur sur de l'or. Ceci permet d'exploiter à la fois la faible dureté de l'or pour établir un contact stable et les propriétés thermiques (température de fusion élevée) du revêtement dur ajouté. Ce principe a déjà été utilisé en recouvrant un contact en or de 50nm de ruthénium [Ke2008] et sera utilisé aussi dans le micro-interrupteur que nous allons étudier.

Outre la force de contact, d'autres paramètres modifient la surface de contact : le fluage et les effets thermiques. Rezvanian et al. ont ainsi modélisé très précisément le fluage mécanique d'un micro-contact et procédé à des mesures directement sur des micro-relais commercialisés par Wispry [Rezvanian2008]. Ils observent que même 90 minutes après l'établissement du contact, du fluage mécanique continue d'être observé. Ce fluage

mécanique correspond à la déformation plastique des aspérités de contact sous l'effet de la contrainte appliquée et il dépend aussi de la température.

La température peut en effet ramollir le matériau et donc amplifier ce phénomène. Le courant a un effet équivalent, engendrant un ramollissement, voire une fonte des aspérités de contact. Kwon et al. ont ainsi montré que le contact s'établit d'autant plus rapidement que le courant circulant au travers est élevé [Kwon2008]. Patton et al. ont mesuré que pour des courants très faibles, inférieurs à $100\mu A$, le phénomène de fluage mécanique est très visible [Patton2005]. Toutefois, dès que le courant est trop élevé la zone de fluage mécanique disparaît quasiment, le contact s'établit quasi-instantanément. Ceci suggère une fonte locale des aspérités, menant à une augmentation directe et durable de l'aire de contact.

Jensen et al. ont montré, en procédant au chauffage (à l'aide d'une plaque chauffante) d'un micro-relais à contacts dorés, qu'une nette amplification du phénomène de fluage a lieu dès $30^\circ C$ (cf. Figure 17 – a). Ils ont ensuite estimé la température de ramollissement de l'or (*softening*) aux environs de $65^\circ C$ dans le cas de leurs couches minces, éloignée des $100^\circ C$ traditionnellement observés pour les matériaux massifs [Jensen2005]. Cette température de ramollissement de l'or peut être reliée à la chute de tension aux bornes du contact [Holm1967], relation qui s'avère inexacte quand la conduction devient balistique [Timsit1983]. Jensen et al. ont montré que tel était le cas dans le micro-relais étudié, et que la chute de tension nécessaire au ramollissement était plus élevée que les 80 mV classiquement observés pour des matériaux massifs (cf. Figure 17 – b). Ainsi, lorsque le rapport λ/a augmente (λ étant ici le libre parcours moyen des électrons dans le métal et a la taille des spots de contact), l'échauffement lié au passage du courant est réduit (les chocs électrons/atomes métalliques sont limités).

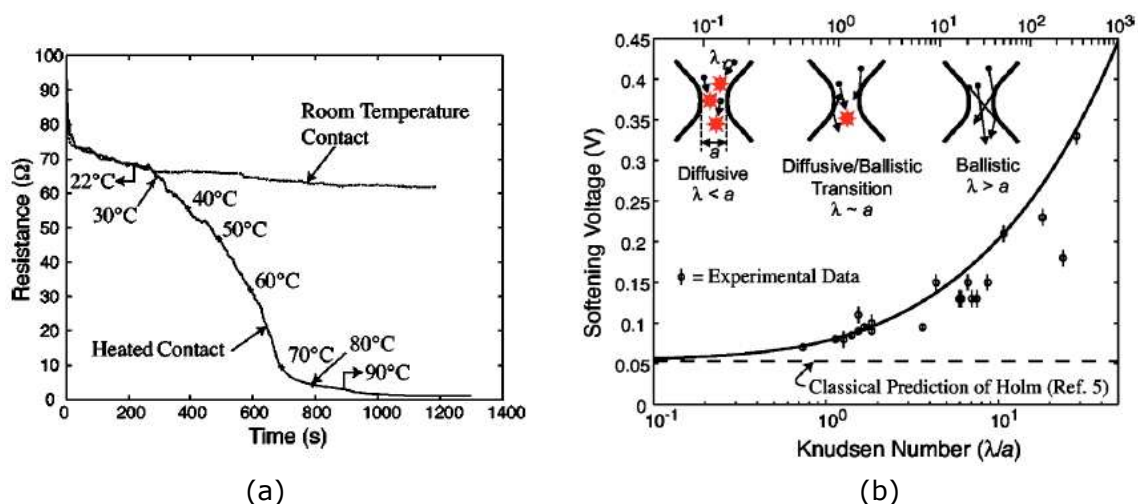


Figure 17. (a) Mise en évidence de l'amplification du fluage par la température. (b) Augmentation de la tension de ramollissement dans le cas d'une conduction balistique. [Jensen2005].

Forces d'adhésion : Concernant les forces d'adhésion, nous pouvons observer dans le tableau précédent que les valeurs rapportées sont très disparates. Pour des contacts en or, les forces d'adhésion vont de dix à quelques centaines de micronewtons. Dickrell et Dugger ont mesuré les forces d'adhésion et ont globalement mis en évidence que deux valeurs de force d'adhésion sont observées pour des contacts en or : $10\mu N$ ou moins et

une centaine de micronewtons [Dickrell2005]. Cette différence de force d'adhésion provient de l'état de surface des contacts. En effet, les forces d'adhésion dans les microcontacts rassemblent les forces d'attraction à courte distance (Van der Waals, effet Casimir) et les forces d'adhésion couramment observées entre deux métaux aux surfaces propres (interactions métalliques). Ils ont ainsi procédé à des tests de cyclage à l'aide de leur banc de test (*hot switching* sous 3.3V/3mA). A chaque cycle la résistance de contact et la force d'adhésion sont mesurées (cf. Figure 18).

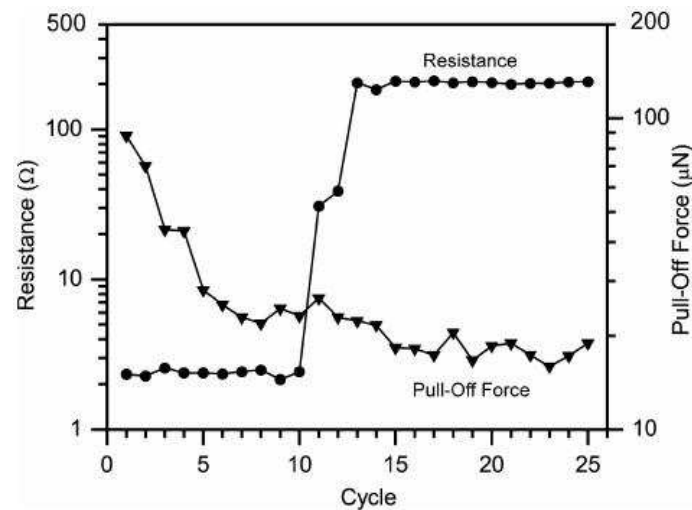


Figure 18. Mise en évidence de la diminution des forces d'adhésion au cours des cycles [Dickrell2005].

Au début du test la résistance est faible (2.2Ω) et la force d'adhésion est élevée ($100\mu\text{N}$). Au fur et à mesure du cyclage la force d'adhésion diminue ($< 10\mu\text{N}$), et la résistance augmente (200Ω). Ce comportement traduit la croissance d'un film de contamination isolant sur les surfaces de contact. Ce film réduit l'adhésion entre les deux contacts métalliques, mais engendre une augmentation de la résistance de contact. Nous pouvons remarquer toutefois, comme l'ont déjà précisé Tringe et al., que sans la présence d'un film de contamination initialement présent sur les surfaces de contacts en or, il serait impossible de rouvrir le contact avec les faibles forces mises en jeu dans les microsystèmes [Tringe2003]. Un tel phénomène sera aussi mis en évidence lors de l'étude de notre micro-interrupteur.

Comme nous venons de le voir, la physique du contact électrique à l'échelle microscopique diffère largement de son homologue macroscopique. De nombreux points restent encore à éclaircir. Nous avons considéré pour l'instant uniquement le contact quasi-statique. Nous allons maintenant voir que lorsqu'un micro-contact est commuté de nombreuses fois, des phénomènes physiques complexes se produisent, qui ont été encore moins bien étudiés que ceux survenant dans le cas du micro-contact quasi-statique.

2.4. Défaillances dans les micro-relais

La commutation répétée (le cyclage) d'un micro-relais avec ou sans courant aboutit généralement à sa défaillance, plus ou moins rapidement. Nous allons voir que différents types de défaillances ont déjà été observés dans les micro-relais MEMS. Pour l'instant il

est difficile de faire ressortir un comportement standard, chaque système étudié semblant se comporter différemment. La majeure partie des résultats intéressants rapportés mettent en jeu des contacts en or, aucune étude approfondie n'a été menée sur d'autres types de matériaux. Nous pouvons cependant noter un certain regain d'intérêt pour l'étude de nouveaux matériaux de contact durant les dernières années [Chen2007, Yang2008, Ke2008].

Dans la majorité des études publiées, la mise en évidence des modes de défaillance se fait par le suivi de l'évolution de la résistance de contact au cours des commutations. Deux comportements sont observés : l'augmentation de la résistance de contact à l'état fermé ou, au contraire, la persistance à l'état ouvert de la valeur de résistance de contact de l'état fermé, traduisant un collage des contacts. Ces deux comportements sont liés à de nombreux phénomènes physiques susceptibles de se produire dans l'interface de contact. Les différents phénomènes identifiés jusqu'à maintenant sont les suivants :

- (1) Collage des contacts
- (2) Contamination des surfaces
- (3) Transferts de matière
- (4) Matage mécanique

A notre connaissance aucune étude complète n'a été réalisée à ce jour, les études publiées s'intéressent à un phénomène en particulier ou au comportement d'un micro-relais spécifique mais ne font pas d'investigation de fond sur les modes de défaillances. L'étude la plus exhaustive est probablement la thèse de Z. Yang [Yang2008] qui comporte deux chapitres s'attachant à comprendre le phénomène de transfert de matière qu'il observe sur des micro-contacts. Notons que durant les trois dernières années trois thèses sur la fiabilité de contact dans les micro-relais ont été soutenues à la North Carolina State University, toutes financées par WiSpry [Yang2008, Brown2008, Walker2009].

Etudions maintenant les conditions dans lesquelles les différents modes de défaillance ont été mis en évidence jusqu'à maintenant.

2.4.1. Collage des contacts

Deux types de collage des contacts se distinguent : le collage dû à des effets de surface, sans influence du courant et le collage par effet thermique, résultant du passage d'un courant.

Le collage « à froid » ou adhésion directe est un phénomène qui peut avoir lieu à température ambiante lorsque deux surfaces extrêmement lisses et très propres sont mises en contact. Cette adhésion est liée à un ensemble d'interactions interatomiques (ionique, covalente et métallique) et intra-atomiques (Van der Waals) à très courtes distances (quelques angströms). Ce phénomène est d'autant plus important dans le domaine des MEMS que les surfaces de contact sont généralement extrêmement lisses (quelques nanomètres de rugosité maximale) et propres. Ceci est d'autant plus problématique que les forces de réouverture des micro-relais sont faibles.

Un autre phénomène peut aussi être à l'origine d'un tel collage : l'adhésion par capillarité. Dans ce cas cependant il ne s'agit pas d'une adhésion directe ; l'adhésion est indirecte et assurée par un film d'humidité présent entre les deux surfaces. Encore une

fois, il peut arriver que les faibles forces de rappel mises en jeu dans les MEMS ne permettent pas de vaincre une telle adhésion. Dans le domaine des MEMS, l'ensemble des phénomènes d'adhésion (directe et indirecte) est regroupée sous le terme de *sticking* [Zhao2003, deBoer1999].

Le collage « à chaud » se produit lorsque du courant circule au travers du contact. Ce passage de courant chauffe les zones de contact et ramollit le métal, le faisant même fondre localement. La formation d'un ménisque de métal fondu peut empêcher, par capillarité, la réouverture du contact ; ou une micro-soudure peut se créer lorsque métal refroidit [Holm1967].

Almeida et al. ont observé sur leur micro-interrupteur à contact latéral un mode principal de défaillance par collage des contacts, apparaissant très tôt, au bout de quelques cycles [Almeida2006]. Cette adhésion est indirecte, et est attribuée à l'humidité ambiante adsorbée par les surfaces des dispositifs pendant leur stockage dans le laboratoire. Un étuvage à 120°C pendant 3h a permis d'éviter cette défaillance, attribuée aux propriétés hydrophiles de l'or. Comme Barriga et al. l'ont montré, l'énergie de l'interface or-eau est deux fois plus importante que pour le cuivre par exemple [Barriga2007]. L'or a donc tendance à adsorber facilement l'humidité, ce qui résulte en une énergie d'adhésion plus importante³.

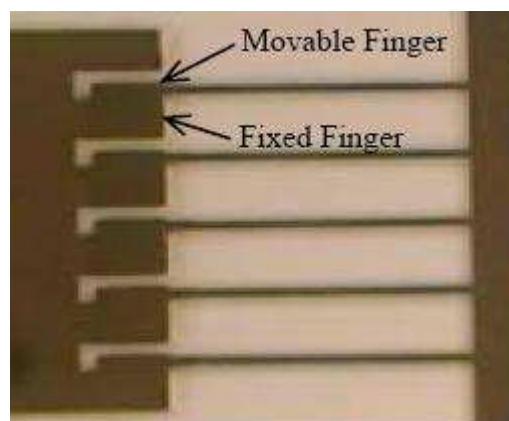


Figure 19. Collage de contacts. [Almeida2006]

Cependant, une fois affranchi de cette adhésion par capillarité, un autre mode de défaillance par collage des électrodes a été observé, mais l'origine n'est pas la même. Avant défaillance, la résistance de contact présente un comportement classique [Majumder2001]: elle diminue régulièrement durant 10^3 cycles, traduisant un matage des surfaces (écrasement des aspérités de contact) puis elle reste stable jusqu'à 10^4 cycles ; mais elle devient ensuite instable et se met à augmenter. Les valeurs fluctuantes observées traduisent une évolution des surfaces que les auteurs imputent à de la fatigue des surfaces ou du micro-soudage. En poursuivant le cyclage les électrodes du micro-interrupteur finissent par rester collées, sous l'effet d'un échauffement trop important lié à l'augmentation de résistance. Ce phénomène a été observé en *cold switching* [Majumder2001] et en *hot switching* [Lee2004, Kim2008, Ke2008].

³ Cette énergie d'adhésion correspond à l'énergie nécessaire pour séparer les deux surfaces ainsi mises en contact. Plus elle est importante, plus une adhésion par capillarité est possible.

Dans tous les cas, la résistance de contact augmente au cours des cycles puis le dispositif finit par ne plus s'ouvrir, ce qui traduit très probablement une soudure liée à un échauffement local important. Ce phénomène est favorisé par la température de fusion faible de l'or et les surfaces de contact réduites qui engendrent des densités de courant importantes. Cette fonte des zones de contact entraîne, si le contact est ouvert sous courant, la formation d'un « pont fondu », qui peut être source de transferts de matières importants.

2.4.2. Transferts de matière

Si un pont fondu apparaît lors de l'ouverture d'un contact sous courant (*hot switching*), il va se rompre de deux manières différentes : soit mécaniquement, à force d'être étiré ; soit par ébullition du métal dont il est formé. En effet, plus le pont s'étire, plus sa section diminue et donc plus la température du métal augmente. La température locale peut devenir tellement élevée que le métal entre en ébullition et se vaporise. Un tel phénomène peut engendrer un arc électrique, ou des projections de métal en fusion sous forme de gouttelettes, comme cela a déjà été observé [Hyman1999, Patton2005] (cf. Figure 20).

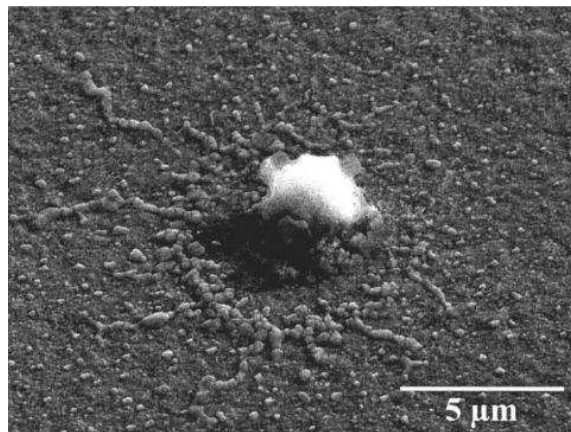


Figure 20. Projection de matière en fusion [Hyman1999].

Pour qu'un arc électrique se développe à l'issue de la rupture de ce pont fondu, certaines conditions de courant et de tension doivent être remplies. Dans le cas de contacts en or, une tension minimale de 12,5V et un courant minimal de 350mA doivent être interrompus. En dehors de ces conditions, aucun arc électrique stable n'a jamais été observé. Nous étudierons en détail la question des arcs électrique dans le chapitre 4, et nous verrons qu'effectivement aux valeurs de tension et courant auxquelles opèrent les micro-relais, aucun arc électrique ne peut être mis en évidence.

La présence d'arcs électriques sur les contacts microscopiques, compte tenu des épaisseurs de matériaux réduites mises en œuvre dans les micro-relais, serait catastrophique, comme en témoigne la figure suivante (cf. Figure 21). Lee et al. ont procédé à des tests de commutation de leur micro-relais en se plaçant en conditions d'arc (12.5V/0.35A) ; le composant est défilant au bout d'une vingtaine de cycles [Lee2004].

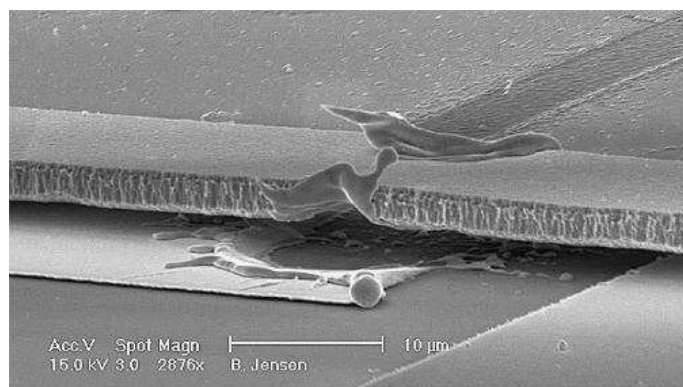


Figure 21. Explosion d'un contact probablement suite à un arc électrique [Jensen2005]

Toutefois, des transferts de matière d'un contact à l'autre sont observés par différents auteurs [Schlaak2002, Thielicke2003, Sakata1999, Yang2008]. Un tel phénomène peut être une cause de défaillance radicale et Z. Yang cherche alors à identifier l'origine de ces transferts. La présence d'arcs électriques ne pouvant pas être mis en évidence, il invoque alors un mécanisme de transfert de matière lié à un phénomène d'évaporation sous l'effet d'un champ électrique intense (*field evaporation*), sans toutefois le démontrer.

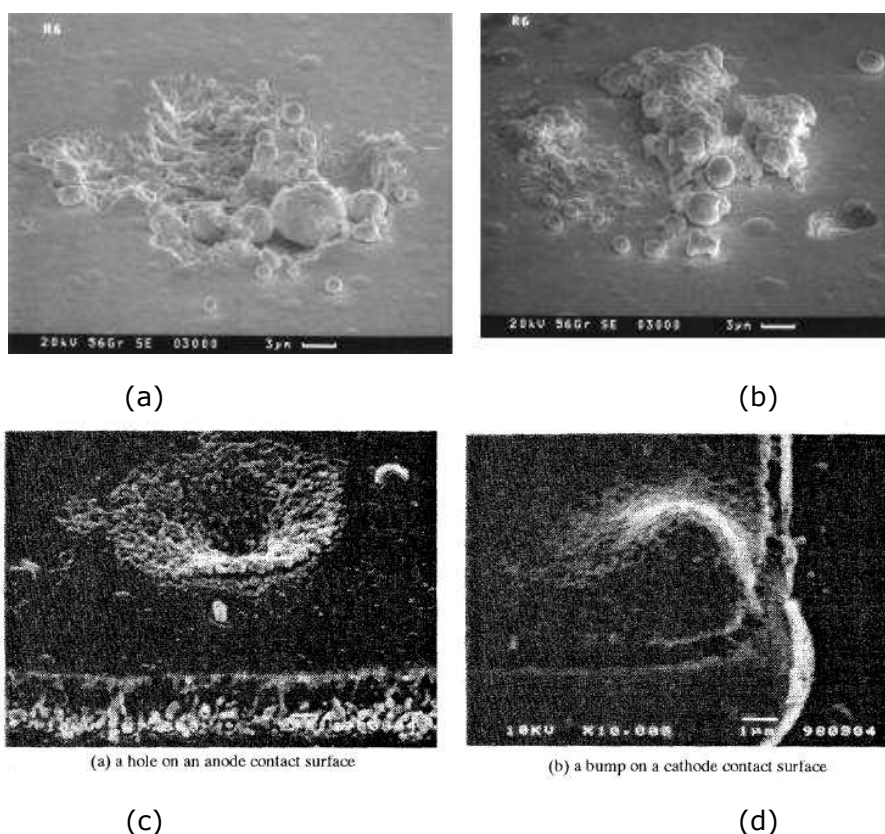


Figure 22. Transferts de matière observés sur un micro-relais.
(a) Contact fixe et (b) Contact mobile, aucune information sur le sens du champ électrique [Schlaak2002]. (c) Anode et (d) cathode [Sakata1999].

Le chapitre 4 est entièrement consacré à ces transferts de matière, et quelques éléments théoriques sur les arcs électriques y sont exposés. Nous ne nous attarderons pas plus

longtemps sur ce phénomène, qui précisons-le toutefois, est l'un des principaux mécanismes de dégradation des contacts macroscopiques.

2.4.3. Contamination des surfaces

A l'échelle microscopique à laquelle opèrent les micro-relais, les effets de surface sont prédominants, le rapport surface/volume étant énorme. De plus, les forces réduites mises en jeu rendent les dispositifs très sensibles aux phénomènes de surface, seule l'extrême surface du matériau étant sollicitée. La majorité des études menées sur les microcontacts attribuent à la contamination de surface un rôle primordial, faisant d'elle la cause principale de défaillance.

La majorité des études publiées ayant été réalisées sous faible courant et tension, les transferts de matière sont généralement limités, et la contamination de surface joue alors un rôle primordial. Nous remarquons d'ailleurs que le peu d'études menées à courants « élevés » [Lee2004, Hiltmann1997, Wright1999] ne font pas état de contamination de surface mais de défaillances par transfert de matière ou soudure. Les principales études sur la contamination de surface dans les microcontacts ont été menées à l'aide d'un appareillage de type nanoindenteur [Tringe2003, Dickrell2007, Dickrell2005, Patton2005]

La présence d'une couche de contamination de 4-6 nm d'épaisseur, principalement constituée de composés hydrocarbonés, a ainsi été mise en évidence sur des contacts en or [Tringe2003]. Des analyses de surface (ToF-SIMS et XPS) confirment la présence de cette couche et sa composition tandis qu'un nettoyage à l'ozone permet d'augmenter la conductivité de la surface, mais ne change pas fondamentalement la composition de la couche de contamination.

Patton et al. ont, quant à eux, procédé à des cyclages sous air et sous azote, à différentes forces (150 μ N et 1mN) et avec des contacts en or. La résistance de contact augmente au cours des cyclages, traduisant une dégradation de la surface de contact. Les auteurs attribuent cette dégradation à la formation d'une couche de contamination sur les surfaces. Une augmentation de la force de contact permet ainsi de retrouver une résistance correcte, traduisant une rupture de ce film de contamination (cf. Figure 23).

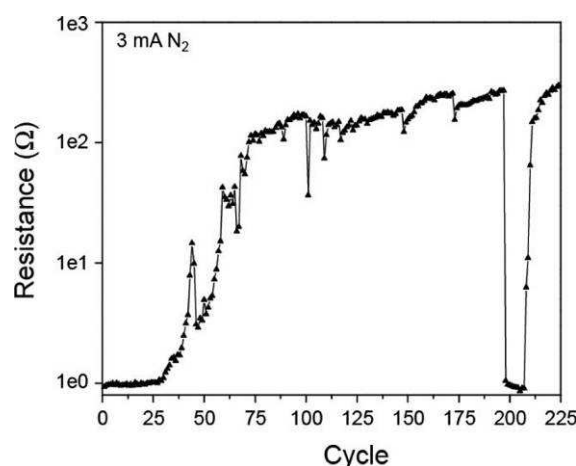


Figure 23. Rupture de la couche de contamination par application d'une force plus importante (1mN appliquée au cycle 198 pendant quelques cycles. La force est ensuite remise à son niveau initial : 150 μ N) [Dickrell2007].

Ils observent aussi que la dégradation est moins importante sous azote que sous air, et est d'autant plus rapide que l'intensité du courant est élevée. Les auteurs suggèrent alors que la croissance de cette couche de contamination pourrait être liée à la décomposition par des micro-arcs des matières organiques présentes dans l'atmosphère ou à la surface des contacts. Les mêmes tests sont ensuite réalisés en prenant soin de nettoyer les surfaces (acétone et méthanol dans des bains à ultra-sons, puis UV-ozone) et en se plaçant sous atmosphère inerte pendant les tests. Lors du cyclage à chaud sous 3.3V/3mA, pourtant, la résistance augmente au cours des cycles tandis que la force d'adhésion diminue, traduisant une contamination des surfaces de contact. Des observations des surfaces de contacts à l'issue des tests révèlent la présence d'une couche de contamination noirâtre, et des analyses de surface (spectroscopie Auger) révèlent que cette contamination est composée majoritairement de carbone.

Chen et al. testent différents alliages à base d'or et de métaux du groupe platine en les faisant cycliser uniquement mécaniquement, sans courant [Chen2007]. Ils observent l'apparition de dépôts carbonés sur les zones de contact, d'autant plus importants que le pourcentage d'or dans l'alliage est faible. Il est suggéré que l'apparition de carbone en l'absence de courant est un phénomène similaire à l'apparition de polymères de friction décrit sur les contacts macroscopiques [Hermance1958]. La friction entre des matériaux catalytiques (tels que les matériaux du groupe platine par exemple) soumet la structure des hydrocarbonés présents sur les surfaces de contact à des contraintes importantes, entraînant la formation de polymères. Ce phénomène sera étudié dans le chapitre 2.

Coutu et al. [Coutu2006] testent aussi différents alliages à base d'or, de platine et de cuivre, en *hot switching*. Ils observent une augmentation progressive de la résistance de contact pour l'alliage AuPtCu, traduisant la croissance progressive d'une couche d'oxyde à la surface des contacts ou la formation d'un composé intermétallique mauvais conducteur. Nous remarquons que la contamination des surfaces de contact peut donc revêtir différents aspects, comme sur des contacts macroscopiques.

2.4.4. Matage mécanique des surfaces

Sous l'action répétée d'un élément de contact sur l'autre, les surfaces de contact se matent. Les aspérités sont déformées plastiquement à chaque cycle et le résultat est que les surfaces deviennent plus lisses (cf. Figure 24) et peuvent alors engendrer une défaillance par collage. Le passage de courant lorsque le contact est fermé peut aussi favoriser ce phénomène.

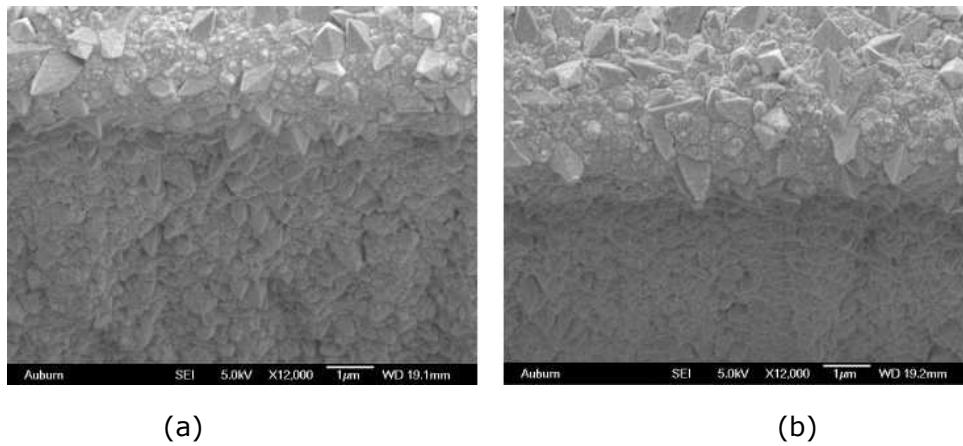


Figure 24. Matage des surfaces de contact. (a) Avant cyclage, le flanc est rugueux et (b) Après cyclage : la zone de contact (flanc) est plus lisse. [Almeida2006]

Chen et al. observent aussi un matage mécanique de leurs surfaces de contact (cf. Figure 25). La force qu'ils appliquent, de l'ordre de $200 \mu\text{N}$, est suffisante pour mater la zone de contact. Des zones de fracture sont observées, ductiles dans le cas de l'alliage Au-5%Ru et cassantes dans le cas de l'alliage Au-10%Ru. Toutefois, aucune augmentation de résistance n'est constatée à l'issue de 10^6 cycles. L'augmentation de la dureté du matériau sous l'action répétée des déformations plastiques (phénomène d'écrouissage) ne semble donc pas suffisante pour engendrer une augmentation de résistance significative à force appliquée constante. Initialement Jensen et al. le pensaient pourtant et ont avancé cette hypothèse pour justifier l'augmentation de résistance qu'ils observaient dans leur micro-relais [Jensen2004].

Cette hypothèse sera remise en cause par les auteurs l'année suivante, en reconnaissant que ce phénomène peut contribuer à l'augmentation de résistance observée mais ne peut en aucun cas justifier à lui seul les augmentations de plusieurs centaines d'ohms observées. L'hypothèse de la présence d'un film de contamination sur les contacts est alors avancée, hypothèse qui s'avère souvent justifiée, nous l'avons vu dans le paragraphe précédent et nous le verrons encore dans la suite de ce manuscrit.

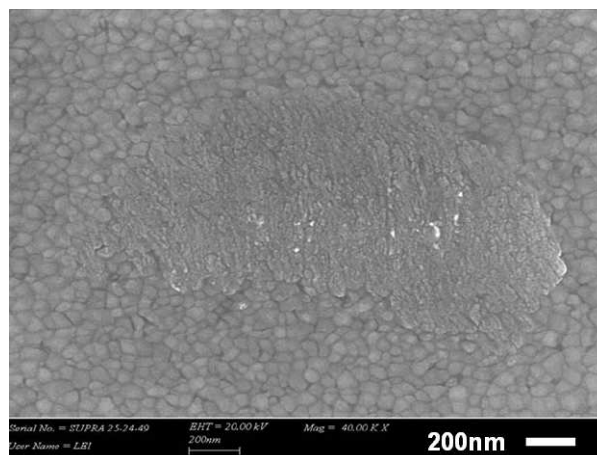


Figure 25. Matage mécanique des surfaces d'un microcontact en AuRu₅ [Chen2007].

Comme nous venons de le voir, les mécanismes de dégradation du microcontact électrique ne sont pas tous compris, le champ d'investigation est encore vaste. Certains comportements standards ont toutefois été mis en évidence alors qu'ils paraissaient encore incompréhensibles au début des années 2000. Le cas de l'augmentation de la résistance de contact à $\sim 100\Omega$ à cause de l'apparition d'une couche de contamination carbonée en est un bon exemple. De plus, certains comportements sont comparables à ceux observés sur des contacts macroscopiques, comme l'apparition de polymères de friction. L'étude des ouvrages de référence n'est donc pas à laisser de côté et complète cette étude bibliographique [Holm1967, Slade1999]

2.5. Tentatives d'amélioration de la fiabilité

En s'inspirant des dispositifs macroscopiques, les concepteurs de micro-relais ont essayé de nombreuses astuces pour améliorer la fiabilité de leurs dispositifs. La première piste d'amélioration dans le domaine du contact électrique est bien évidemment de trouver de nouveaux matériaux de contact. Ce point sera abordé en détails dans le chapitre 3, nous ne le traiterons pas ici. Les autres voies d'amélioration possibles sont les suivantes.

Atmosphère gazeuse : Recourir à des atmosphères gazeuses différentes est une technique qui a porté ses fruits dans le monde macroscopique [Koch2003, Picot2000]. Dans le domaine des microsystèmes, le développement de solutions de packaging hermétique a permis d'avoir aussi recours à ce genre d'atmosphère. Le packaging de microsystèmes est une étape indispensable, sans laquelle la manipulation et l'utilisation de ces dispositifs micrométriques est impossible. De nombreuses techniques de packaging existent, mais nous n'aborderons pas ce sujet. Le plus important dans notre étude est que ce packaging soit hermétique –ou à défaut étanche– pour permettre l'utilisation d'atmosphères contrôlées. Il doit, de plus, ne pas apporter de pollutions supplémentaires. Par exemple l'une des méthodes basiques de packaging consiste à coller une cavité creusée dans du silicium sur le dispositif, à l'aide d'un scellement en polymère. Une telle méthode pose de nombreux problèmes de fiabilité, le scellement polymère ayant tendance à dégazer dans la cavité et contaminer les dispositifs. Ainsi Texas Instruments a rencontré un problème de ce type lors du développement de son DMD. La lentille polymère faisant office de packaging dégazait dans le dispositif et polluait les micro-miroirs. Plus récemment, dans le domaine des micro-relais, Gueissaz et al. [Gueissaz2001] ont développé un micro-reed avec un packaging à scellement polymère. La résistance de contact initiale est comprise entre 2Ω et 20Ω alors qu'après packaging elle peut atteindre 200Ω et la durée de vie n'excède pas 10^5 cycles, beaucoup moins que sans le packaging. Les auteurs attribuent ce phénomène à la contamination des surfaces de contact par les vapeurs organiques provenant du scellement du packaging.

Majumder et al. [Majumder2003] utilisent un packaging hermétique sous azote à pression atmosphérique, réalisé par *wafer bonding*⁴, sans polymère et qui n'entraîne pas de réduction de la durée de vie (10^9 cycles en *cold switching*, avec packaging ou dans une enceinte remplie d'azote). Dans la littérature, la majorité des micro-relais possédant

⁴ Le wafer bonding est un terme générique utilisé pour désigner le procédé de souder deux wafers ensemble. Ce procédé peut employer un scellement polymère dans certains cas, mais dans la majorité des cas il s'agit plutôt d'un scellement par thermocompression, par fusion, par adhésion moléculaire ou à l'aide d'un scellement (eutectique, verre fritté...).

un packaging utilisent un gaz neutre, principalement l'azote. Elger et al. ont observé que si leur micro-relais n'est pas packagé, la résistance de contact commence à augmenter dès 100 cycles, ce qu'ils attribuent à la croissance d'un film de contamination [Elger2004]. Une fois packagé sous azote à l'aide d'un packaging hermétique, la résistance de contact se dégrade beaucoup moins rapidement. Dickrell et al. [Dickrell2004], ont procédé à des tests d'endurance sous air et sous azote. Ils ont ainsi montré que la résistance de contact sous air augmente plus rapidement que sous azote au cours du cyclage (cf. Figure 26). Ils attribuent ceci à la croissance d'une couche de contamination à la surface des contacts, que l'atmosphère protectrice d'azote semble ralentir.

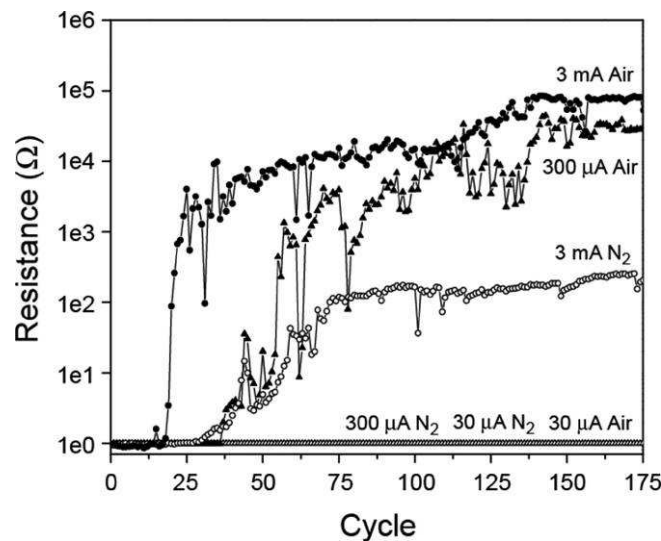


Figure 26. Comparaison de durée de vie sous air et sous azote [Dickrell2004].

Dans le domaine des micro-relais, aucune autre étude plus poussée portant sur l'influence de l'atmosphère n'a été réalisée, à l'exception de travaux de thèse récents qui testent différentes méthodes de nettoyage des surfaces associées à différentes atmosphères de test [Walker2009].

Environnement liquide : L'utilisation d'huile diélectrique pour assurer la coupure du courant est une technique couramment utilisée dans les disjoncteurs moyenne tension [Théoleyre1998]. Cette technique permet de générer très rapidement une quantité importante de gaz lorsqu'un arc électrique se développe, et la détente de ce gaz permet alors d'éteindre l'arc. L'utilisation d'un tel principe dans un micro-relais n'est donc pas forcément justifiée si le composant opère à des tensions faibles, mais il a tout de même été testé sur un nano-relais électrostatique [Lee2009] (cf. Figure 27). Les résultats présentés indiquent une nette amélioration de la durée de vie, en engendrant une résistance de contact plus stable dans le temps et la suppression des collages. Le mécanisme mis en jeu est probablement différent de celui décrit ci-dessus, mais le principe est intéressant.

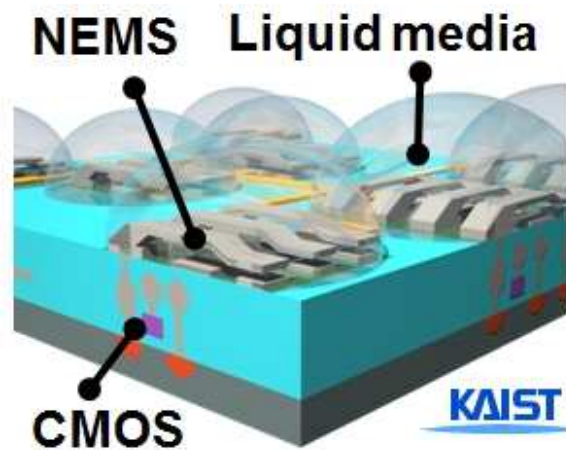


Figure 27. Nano-relais électrostatique opérant dans de l'huile diélectrique. [Lee2009]

Astuces de conception : Dans le domaine des microsystemes, très peu de travail a été réalisé sur les géométries des contacts. La majorité des micro-relais existants possède un contact de type pastille sur plan, avec des pastilles de contact de l'ordre du micromètre de diamètre ou plus. En fonction des étapes technologiques réalisées, ces pastilles sont plutôt de type sphère [Coutu2006] ou plan [Jensen2005, Majumder2001, Schlaak2002]. Plusieurs contacts sont parfois utilisés, dans le but de réduire la densité de courant passant dans chacun d'eux et assurer une redondance des surfaces de contact [Majumder2003, Chow2007]. Malheureusement, comme nous l'avons vu précédemment, étant données les forces faibles mises en jeu, le contact ne se fait que sur des aspérités et l'intérêt de telles géométries n'est pas totalement justifiable. L'utilité d'une structuration des surfaces de contacts à l'échelle du micromètre n'est donc pas évidente, et nous verrons dans le chapitre 4 qu'elle peut s'avérer néfaste.

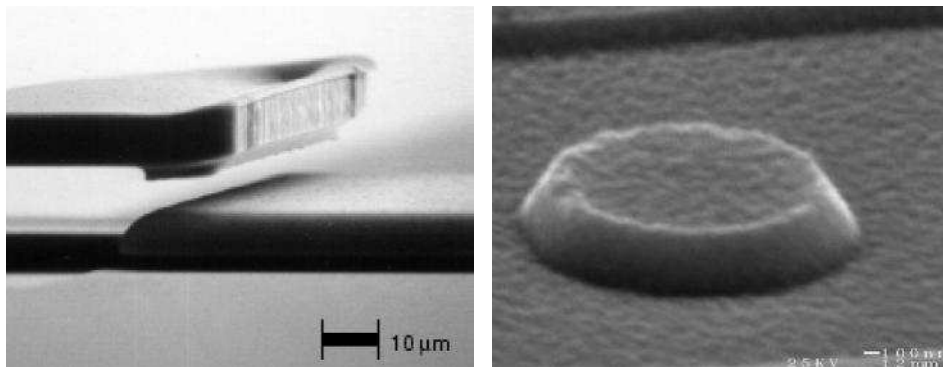


Figure 28. Exemples de géométries de contact dans des micro-relais [Gueissaz2001, Majumder2001].

L'utilisation quasi exclusive de l'or dans les micro-relais a pour conséquence d'engendrer des défaillances par collage permanent des contacts. Liu et al. [Liu2001] ont ainsi développé pour Advantest un micro-relais muni d'une matrice de micro-ressorts répartis sur la zone de contact. Ceci permet de réaliser un contact électrique sur une zone étendue, grâce à la déformation de ces structures souples et d'éviter le collage des contacts, les micro-ressorts servant à créer une force supplémentaire lors de l'ouverture du contact. Le même concept a d'ailleurs été breveté en 2004 par Intel [Ma2004].

Teravicta, pour s'affranchir de ces problèmes de collage a développé une structure originale permettant de développer une force supplémentaire pour faciliter l'ouverture du contact [Teravicta2003, Teravicta2006].

Dans le domaine macroscopique, des contacts glissants ont été développés, pour permettre de « nettoyer » les surfaces de contact à chaque fermeture et ainsi enlever les éventuelles couches d'oxyde ou de contamination carbonée. Dans le domaine des microsystemes, où les forces de contact ne sont pas assez élevées pour rompre les couches de contamination ou d'oxyde, l'utilisation de tels contacts peut donc être intéressante. Weber et al. [Weber2005] ont ainsi utilisé ce principe dans leur micro-relais. Deux contacts obliques sont mis en vis-à-vis (cf. Figure 29), assurant un contact glissant. Pour eux, un tel contact permet d'assurer une surface de contact contrôlable, de façon bien meilleure que lorsque deux surfaces planes sont mises en contact. Kruglick et al. ont aussi exploré cette voie en réalisant des contacts obliques [Kruglick1999]. Ils ont ainsi obtenu une résistance de contact plus faible que lorsque le contact est plan/plan et leur micro-relais a pu supporter un courant plus élevé.

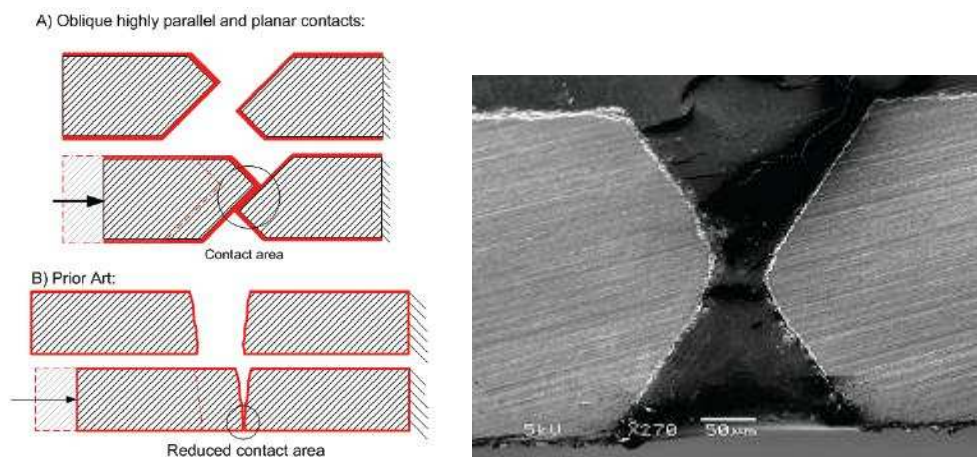


Figure 29. Exemple de réalisation de contact glissant [Weber2005].

Un brevet appartenant à MEMSCAP exploite aussi ce principe [Agrawal2003] et Shi et al. ont aussi étudié ce principe en réalisant un micro-relais à contact glissant qu'ils qualifient d'« autonettoyant » [Shi2005]. Une amélioration supplémentaire a été apportée, en créant des ondulations sur l'une des surfaces de contact (cf. Figure 30). Ceci permet d'évacuer les éventuelles particules ou contaminants présents entre les deux contacts et donc de réaliser un meilleur contact. Cependant, encore une fois, l'efficacité de ce design n'est pas clairement démontrée.

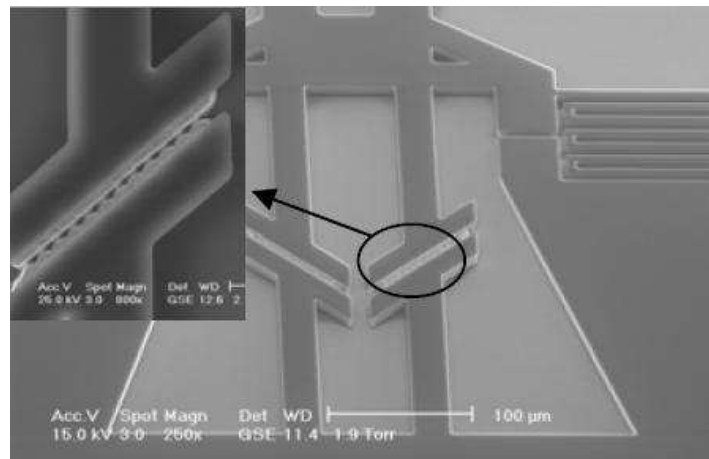


Figure 30. Exemple de contact glissant et ondulé [Shi2005].

Pour prévenir la présence d'arcs électriques à l'ouverture et/ou à la fermeture du contact, Yonezawa et al. [Yonezawa2004] ont développé un micro-relais à contact multiple qui permet de séparer les fonctions d'interruption et de transport du signal. Ainsi, une multitude de contacts en parallèle, reliés à des résistances de valeurs adaptées permet d'interrompre ou de rétablir le courant tout en restant en dehors des conditions d'arc. Une fois le courant interrompu (ou établi), une électrode principale, qui ne subit absolument aucune dégradation grâce au système d'électrodes multiples, permet de transporter le signal. Un principe un peu différent et moins complexe est aussi breveté par MCNC [MCNC1999]. Une membrane flexible vient mettre en contact un premier contact puis un second (cf. Figure 31). Lors de l'ouverture l'ordre est inversé, permettant alors d'utiliser l'un des contacts pour encaisser les dégradations liées aux phases d'ouverture et de fermeture, tandis que l'autre contact assure simplement le transport du signal. Un tel principe est appelé contact sacrificiel.

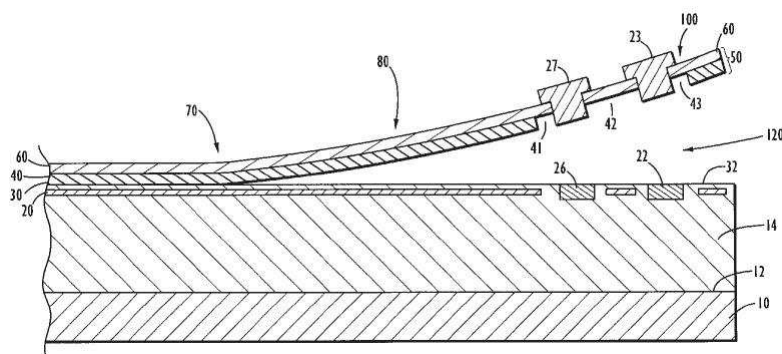


Figure 31. Exemple de micro-relais à contact sacrificiel [MCNC1999].

Après cette longue partie bibliographique, nous allons maintenant nous intéresser au micro-interrupteur développé par Schneider Electric en partenariat avec le CEA-Leti. Ce dispositif est le pilier central de cette thèse, et nous allons étudier son fonctionnement en détail dans le paragraphe qui suit.

3. Le micro-interrupteur Schneider Electric / CEA-Leti

Comme précisé dans la première partie de ce chapitre, le micro-interrupteur développé est une version simplifiée du micro-relais électromagnétique qui avait été conçu par Magfusion. Ce paragraphe présente le principe de fonctionnement de ce composant ainsi que ses caractéristiques principales et s'intéresse ensuite au calcul de la force de contact et de la résistance de contact.

3.1. Principe de fonctionnement

Le micro-interrupteur est composé d'un cantilever ferromagnétique ; que nous appellerons membrane étant données ses proportions : $800 \times 800 \times 8 \mu\text{m}^3$. Elle est réalisée en Fe80Ni20, un matériau ferromagnétique doux qui peut donc s'aimanter fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur tout en présentant un hystérésis magnétique assez faible. La membrane peut pivoter grâce à deux bras de torsion dimensionnés pour se déformer élastiquement. Des ancrages permettent de maintenir cet ensemble à $3 \mu\text{m}$ au dessus du substrat, espacement obtenu grâce au retrait par voie humide d'une couche sacrificielle de SiO_2 (cf. Figure 32).

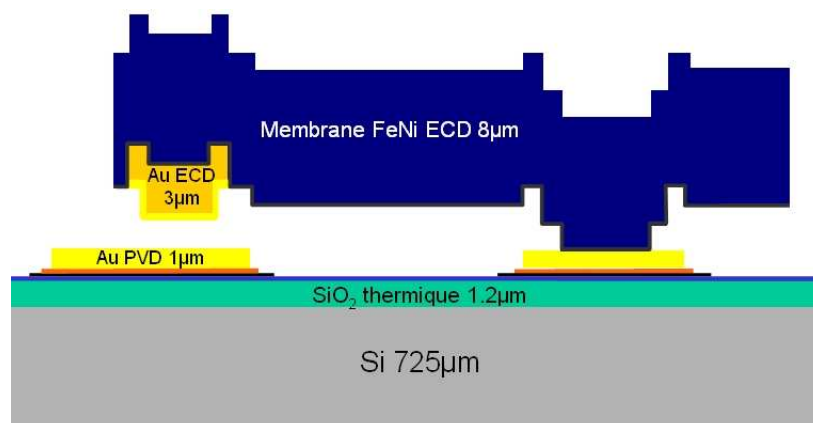


Figure 32. Empilement technologique du micro-interrupteur étudié.

Le nez de la membrane mobile porte un contact électrique en or, d'une épaisseur de $3 \mu\text{m}$ obtenu par électrodéposition. Le substrat comporte une piste électrique en or de $1 \mu\text{m}$ d'épaisseur réalisée par pulvérisation. L'ensemble du dispositif est isolé du substrat silicium par une couche d'oxyde de silicium.

Lorsque la membrane est soumise à un champ magnétique extérieur ; elle s'aimante le long de son axe d'aimantation facile qui est dans son plan. Ceci entraîne son alignement avec les lignes du champ magnétique extérieur [Ruan2001]. Le micro-interrupteur utilise cette particularité pour son actionnement. Le déplacement d'un aimant permanent aimanté verticalement permet alors de faire pivoter la membrane (cf. Figure 33). Au passage du plan médian de l'aimant, les lignes de champ changent de direction, commutant ainsi la membrane et faisant donc passer le contact électrique d'un état ouvert à un état fermé.

Le dispositif développé est donc dépourvu d'un actionnement intégré, son actionnement est possible en utilisant un aimant permanent extérieur (ou une bobine). Cette

particularité rend le dispositif très simple comparé au micro-relais initial, mais il requiert toutefois près de 70 étapes de fabrication, étapes réalisées intégralement sur la ligne MEMS 200mm du CEA-Leti à Minatoc.

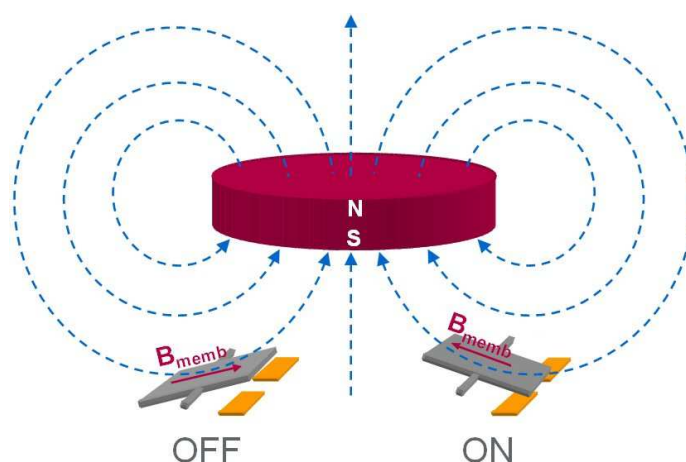


Figure 33. Principe d'actionnement du micro-interrupteur. Lors du passage du plan médian de l'aimant, la membrane change d'orientation.

Le micro-interrupteur sera toujours actionné grâce à un aimant mobile, le passage de plan médian assurant la commutation. Ce principe d'actionnement permet d'obtenir une vitesse de commutation la plus rapide possible, les lignes de champ changeant de direction sur une distance extrêmement réduite (cf. Figure 33)⁵. De cette façon, le temps de commutation est indépendant de la vitesse de déplacement de l'aimant. Pour le vérifier, nous avons procédé à des mesures de vitesse de commutation à l'aide d'un vibromètre laser à effet Doppler (présentées dans l'annexe 1).

Cette méthode permet de mesurer la vitesse de déplacement vertical de la membrane mobile, et donc de remonter au temps que met le dispositif pour passer d'une position à l'autre. Le test a été réalisé en actionnant le micro-interrupteur à l'aide d'un aimant mobile déplacé à trois fréquences différentes et le résultat est présenté dans le tableau 6. Ces résultats confirment que le micro-interrupteur fonctionne bien comme prévu : le temps de commutation, temps pendant lequel la membrane se déplace verticalement, semble indépendant de la fréquence d'actionnement.

Fréquence d'actionnement (Hz)	12	32	48
Vitesse verticale de la membrane (mm/s)	15	21	29
Temps de commutation (μ s)	84	97	88

Tableau 6. Résultats de mesure obtenus au vibromètre laser. Vitesse de déplacement et temps de commutation.

Ces données nous informent que le temps de commutation du dispositif est d'environ 90 μ s, quelle que soit la fréquence de test. De plus le contact se ferme avec une vitesse d'environ 20 mm/s. Cette vitesse est assez réduite, en particulier si nous la comparons à

⁵ Un second mode de commutation existe, qui à l'inverse du passage du plan médian n'est pas un mode quasi-instantané. A chaque extrémité de l'aimant, les lignes de champ se courbent progressivement, entraînant la membrane du micro-interrupteur. Dans ce cas, la vitesse de commutation est directement proportionnelle à la vitesse de déplacement de l'aimant.

la vitesse de fermeture (et d'ouverture) d'un contacteur électromagnétique (0.1 à 1 m/s) ou celle d'un disjoncteur (10 m/s). La vitesse de fermeture d'un interrupteur est un paramètre important dans le phénomène de coupure de l'arc électrique par exemple. La vitesse faible du micro-interrupteur ne joue donc pas en notre faveur, comme nous le mettrons en évidence dans le chapitre 4.

3.2. Connexions électriques

La Figure 34 est un cliché au microscope optique du micro-interrupteur. La membrane ferromagnétique est bien visible, suspendue par les bras de torsion et les ancrages. Le nez de la membrane porte le contact mobile qui est en fait une paire de contacts en parallèle. Nous verrons que la présence de ces deux contacts en parallèle est indispensable pour assurer une durée de vie satisfaisante du dispositif.

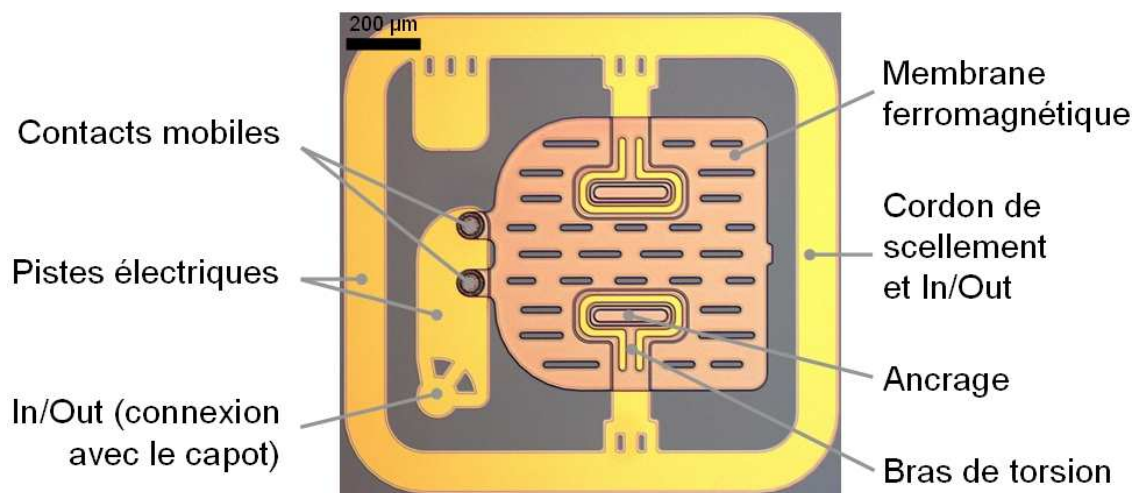


Figure 34. Photographie optique du micro-interrupteur.

Le courant circule entre les deux pistes dorées par le biais de la membrane. Le courant est injecté dans la piste carrée qui fait le tour de la puce, il circule ensuite à travers les ancrages et les bras de torsion puis parcourt la membrane et arrive aux contacts. Si le micro-interrupteur est en position fermée, le courant passe alors dans la petite piste verticale visible sur la gauche de la Figure 34. La piste faisant le tour de la puce joue aussi le rôle de cordon de scellement et permet de venir sceller sur le dispositif un second wafer de silicium dans lequel est creusée une cavité.

3.3. Packaging

La Figure 35 présente le micro-interrupteur équipé de son capot en silicium qui permet de protéger le dispositif et de reprendre le contact électrique sur les deux pistes dorées. A l'extérieur du capot deux plots métalliques équipés de billes de soudure sont présents et permettent de souder le composant sur un circuit électronique. L'ensemble du composant est ainsi compatible avec la technologie SMT (Surface Mount Technology), technique d'assemblage de composants électroniques utilisée par l'ensemble de l'industrie électronique.

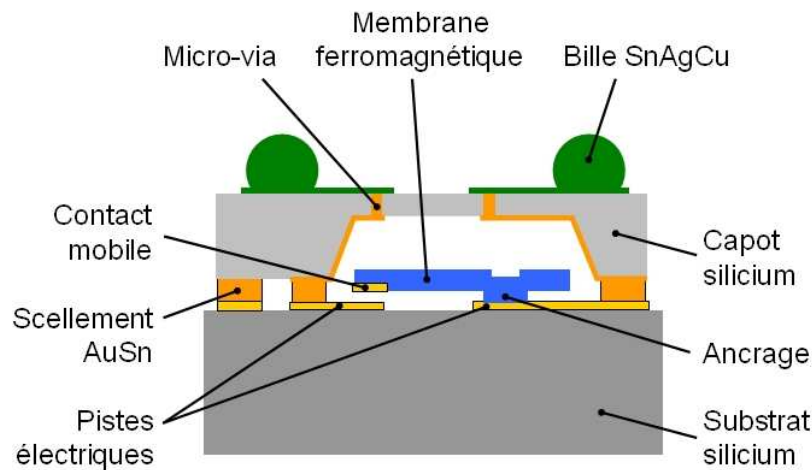


Figure 35. Schéma du composant complet avec son packaging silicium à scellement eutectique.

Cette méthode de packaging, sous-traitée dans notre cas, utilise un cordon de scellement en Au80Sn20 pour sceller le capot sur le micro-interrupteur [Elger2004]. Cette méthode présente l'avantage d'obtenir un packaging hermétique pouvant être rempli de gaz inerte (N_2 à 0.5 bar dans notre cas), et surtout elle n'emploie aucun matériau organique susceptible de dégazer et contaminer nos surfaces de contact. Le seul inconvénient est que des températures de l'ordre de $350^\circ C$ sont requises pour que le scellement soit efficace (formation d'un eutectique). La Figure 36 présente des photographies du micro-interrupteur ainsi packagé.

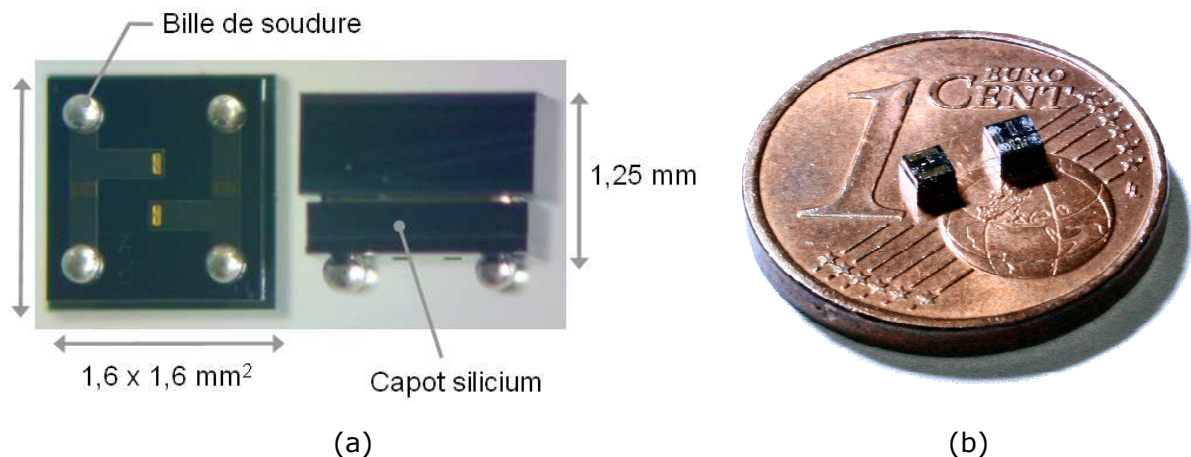


Figure 36. (a) Photographies optiques du composant packagé. (b) Comparaison de taille avec une pièce de un cent d'euro.

3.4. Le contact électrique

Nous avons vu que le contact électrique est en fait un double contact, les deux contacts étant en parallèle (cf. Figure 37 – a). L'élément de contact mobile porté par la membrane se compose d'un plot circulaire de contact de $50\text{ }\mu m$ de diamètre et $1\text{ }\mu m$ de hauteur (cf. Figure 37 – c) tandis que l'élément de contact fixe est simplement une piste plane, sans relief particulier. La distance inter-électrodes lorsque le dispositif est en position ouverte varie entre quelques microns minimum et près d'une vingtaine de microns dans certains

cas, en fonction des designs réalisés et des déformations de la membrane liées aux contraintes résiduelles du matériau (cf. Figure 37 – b).

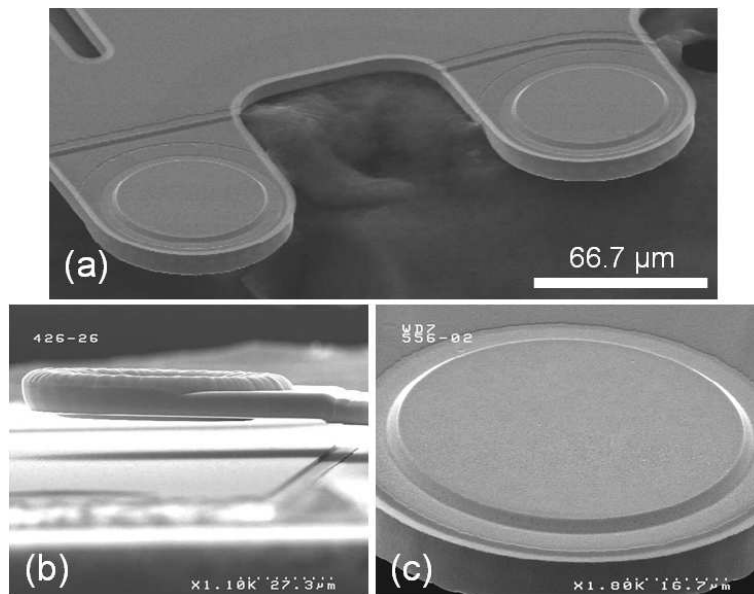


Figure 37. Observations au microscope électronique à balayage (MEB) du contact électrique.

(a) Membrane retournée et visualisation du double contact, (b) Distance entre la partie mobile et la partie fixe, (c) Agrandissement d'un plot de contact.

Les contacts sont réalisés en or, comme précisé précédemment. Des contacts en ruthénium ont aussi été développés, en ajoutant simplement une couche de 100 nm d'épaisseur déposée par pulvérisation. Cette couche est déposée durant la fabrication, directement par-dessus l'or du contact fixe, sous forme d'une pastille de 100 μm de diamètre à l'aplomb de chaque plot de la partie mobile. Pour le contact mobile, le ruthénium est déposé avant l'étape de dépôt électrolytique de l'or. Ceci permet de conserver un contact suffisamment mou pour avoir un contact stable, mais possédant un matériau en surface avec une température de fusion plus élevée que l'or. Des performances accrues sont donc attendues pour les contacts recouverts de ruthénium. De plus, cette astuce permet de ne modifier que très légèrement le procédé de fabrication du composant.

3.4.1. Calcul de la force de contact

La force de contact appliquée dans le micro-interrupteur est un paramètre important, nous l'avons vu dans le paragraphe précédent. Il est donc important de s'assurer que la force développée par le dispositif est suffisante pour obtenir un contact stable, en particulier si nous envisageons de tester différents matériaux de contact. Il est possible de calculer assez précisément la force de contact en fonction de la position de l'aimant par rapport à la membrane. Le calcul n'est pas présenté ici, il est détaillé dans l'annexe 2. Le couple exercé sur la membrane par le champ magnétique extérieur s'exprime ainsi :

$$\Gamma_{mag,x} \approx \frac{L_{memb}^2 \cdot W_{memb}}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_{aimant}^2 \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \quad (1.19)$$

Avec L_{memb} la longueur totale de la membrane (800 μ m), W_{memb} sa largeur (800 μ m), μ_0 la perméabilité du vide et α l'angle entre le champ magnétique de l'aimant s'exerçant au niveau de l'axe de rotation et la verticale. Le champ de l'aimant B_{aimant} peut quant à lui être calculé en tout point en connaissant ses dimensions et sa position par rapport à la membrane. La force de contact exercée à l'extrémité de la membrane est alors égale à :

$$F_C \approx \frac{\Gamma_{mag,x} - \Gamma_{méca}}{d_{bras_levier}} \quad (1.20)$$

Avec $\Gamma_{méca}$ le couple de rappel des bras de torsion (0.017 μ N.m dans notre cas) et d_{bras_levier} la distance entre les bras et l'extrémité de la membrane (le bras de levier, 465 μ m dans notre cas). Il est important de noter que notre micro-interrupteur possède deux contacts, la force de contact totale doit donc être divisée par deux pour connaître la force par contact. La Figure 38 présente alors le résultat du calcul de la force de contact en fonction de la position du dispositif par rapport au plan médian de l'aimant.

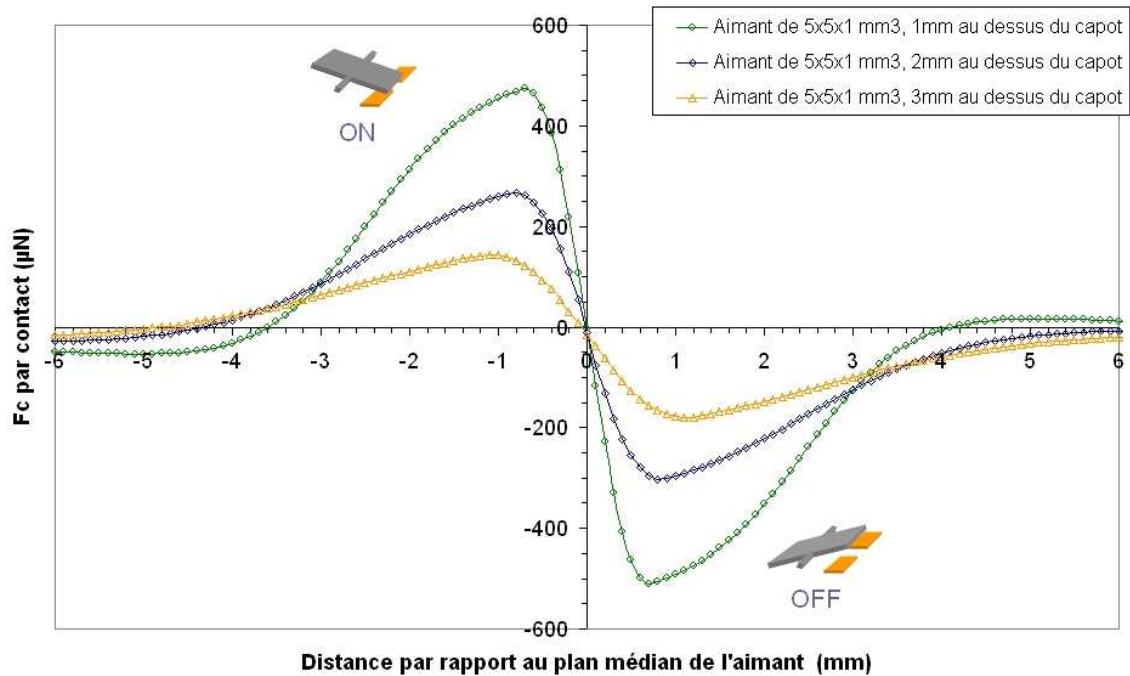


Figure 38. Calcul de la force de contact développée dans le micro-interrupteur en fonction de la position de l'aimant par rapport au composant.

Nous remarquons que la force de contact que le micro-interrupteur est capable de développer est importante. L'avantage de ce mode d'actionnement est que cette force peut aisément être contrôlée en utilisant un aimant plus gros ou en le plaçant plus près du dispositif. De plus, la force d'ouverture est aussi élevée que la force de contact, ce qui n'est pas le cas dans un micro-interrupteur électrostatique par exemple où la force d'ouverture est simplement la force de rappel exercée par la raideur mécanique du cantilever.

3.4.2. Caractérisation de la résistance de contact

En utilisant les modélisations de résistance de contact que nous avons détaillées dans la première partie de ce chapitre, il est possible de tenter d'évaluer la résistance de contact

de notre micro-interrupteur. Examinons deux cas distincts : le cas d'une déformation purement élastique des matériaux et le cas d'une déformation purement plastique. Les propriétés mécaniques de nos matériaux de contact ont été mesurées à l'aide d'un nanoindenteur, directement sur les dispositifs. Les valeurs de module d'Young et de dureté, prises à 10% de l'épaisseur totale du film, sont présentées dans le Tableau 7 et l'évaluation des rayons de contact effectifs en fonction de la force appliquée est présentée en Figure 39.

	Module d'Young E (GPa)	Dureté H (GPa)
Au contact fixe	85	0.8
Au contact mobile	80	1
Ru 100 nm	250-300	5-8

Tableau 7. Propriétés mécaniques des matériaux de contact utilisés.

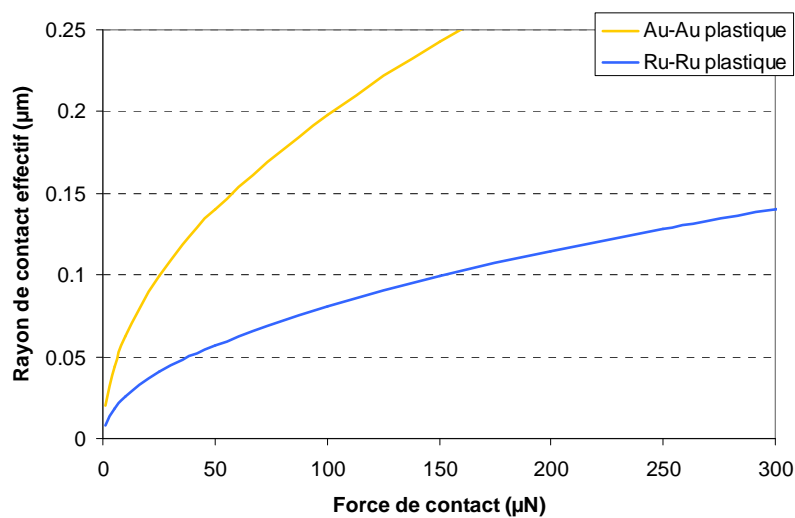


Figure 39. Estimation du rayon de contact en fonction de la force appliquée. (Formule 1.6)

Nous remarquons que les deux matériaux se comportent différemment, ce qui est normal étant donnée leurs duretés très différentes. Nous avons présenté sur cette figure uniquement le cas d'une déformation purement plastique. Réaliser le même calcul dans le cas d'une déformation élastique nécessite, en effet, de connaître le rayon de courbure des aspérités de contact, paramètre difficilement mesurable. Si nous procédons à une estimation de la pression de contact, en divisant simplement la force appliquée par la surface de contact obtenue grâce au rayon de contact calculé, nous nous apercevons que les limites d'élasticité de l'or et du ruthénium sont atteintes dès les premiers μN de force de contact (205MPa pour l'or, 372MPa pour le Ru). L'hypothèse d'une déformation majoritairement plastique paraît donc justifiable.

De plus, nous remarquons que pour l'or, le rayon de contact devient supérieur au libre parcours moyen des électrons (36nm) dès quelques μN de force appliquée. Une conduction électrique diffusive est donc justifiée. Il en va de même pour le ruthénium, qui possède un libre parcours moyen proche de 10nm. En utilisant alors l'hypothèse

d'une conduction diffusive, nous pouvons estimer la résistance de contact dans notre micro-interrupteur en fonction de la force appliquée (cf. Figure 40).

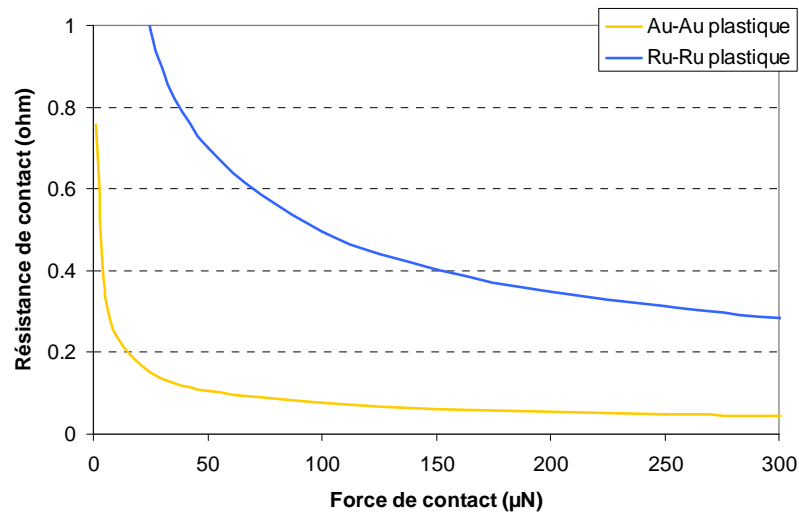


Figure 40. Estimation de la résistance de contact en fonction de la force appliquée.
(Formule 1.14)

Nous avons ensuite procédé à des mesures réelles sur nos dispositifs. Pour cela nous avons utilisé un banc de test permettant de déplacer un aimant permanent en SmCo de 5x5x1 mm³ par rapport au composant. La connaissance de la position de l'aimant permet de calculer la force de contact dans le micro-interrupteur (cf. paragraphe 3.4.1) et la résistance de contact est mesurée par une méthode 4 pointes avec un courant continu de 1mA. La contribution liée au packaging est soustraite pour estimer au mieux la valeur de la résistance de contact. Le résultat obtenu avec des contacts en or et en ruthénium est illustré par la Figure 41.

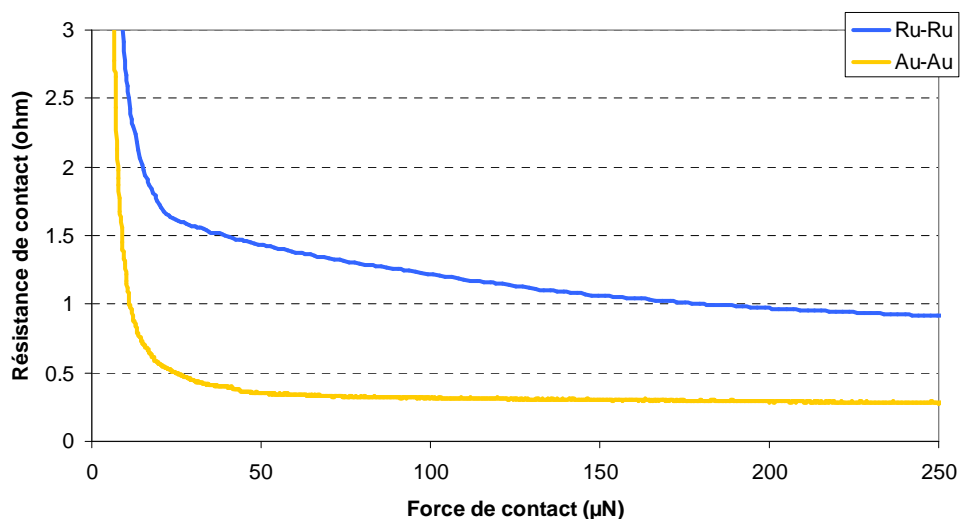


Figure 41. Mesure sur le micro-interrupteur de la résistance de contact en fonction de la force de contact appliquée.

Un contact stable est obtenu dès 50 μ N de force de contact appliquée, valeur inférieure aux 100 μ N généralement constatés pour des contacts en or. Le ruthénium, quant à lui, nécessite une force légèrement supérieure pour être réellement stable, mais dans la gamme de force utilisée la résistance est basse et varie peu. L'utilisation de contacts en ruthénium est donc possible avec notre dispositif, et permettra, nous l'espérons, une durée de vie accrue. Le doute sera levé dans le chapitre suivant qui présente les tests d'endurance réalisés sur le micro-interrupteur ainsi que l'analyse et la compréhension des mécanismes de dégradation du contact électrique.

4. Conclusions du chapitre et perspectives

Nous l'avons vu, le marché des micro-relais MEMS est encore balbutiant. Très peu de dispositifs sont disponibles commercialement et ils sont en général réservés à des usages internes pour l'instant. Leur durée de vie n'est pas encore atteint le niveau des technologies concurrentes et leurs capacités à interrompre ou rétablir des signaux de puissance sont extrêmement limitées. Un marché important reste donc à conquérir pour celui qui parviendra à mettre au point un micro-relais performant.

Ce manque de fiabilité est principalement dû à une connaissance très limitée des mécanismes à l'origine des défaillances de ces micro-relais. Le contact électrique est le point limitant de cette technologie et sa dégradation au cours de l'utilisation du produit est un réel problème qui est mal connu actuellement. Les premières études dans ce domaine ont été menées sur des contacts expérimentaux et très peu sur des dispositifs MEMS complets. Les dernières années ont cependant vu un nombre croissant d'études de fiabilité sur des dispositifs « industriels ». Malheureusement les phénomènes physiques à l'origine des défaillances sont encore mal compris, et leur étude à cette échelle microscopique est difficile.

La suite de ce manuscrit présente une étude de fiabilité du contact électrique menée sur un micro-interrupteur en phase pré-industrielle. La compréhension des phénomènes physiques à l'origine des défaillances est le point central de l'étude. Trouver un matériau de contact mieux adapté que l'or ou une conception de micro-relais plus performante n'a pas de sens si l'origine physique des défaillances n'est pas identifiée. C'est avec cet état d'esprit que l'ensemble du travail présenté par la suite a été mené.

Chapitre 2

Endurance du contact électrique sur le micro-interrupteur Schneider/Leti

Le micro-interrupteur développé par Schneider Electric en collaboration avec le Département d'Intégration Hétérogène sur Silicium (DIHS) du CEA-Leti est destiné à différentes applications, chacune possédant son propre cahier des charges. Pour remplir les différents cahiers des charges, de nombreux critères entrent en jeu, qui n'ont pas tous rapport au contact électrique. Les performances mesurées du micro-interrupteur sont présentées dans le Tableau 8 ci-dessous.

Performances électriques	
Gamme de tension	0 - 14 Vdc
Niveau de courant admissible en commutation (charge résistive)	0 - 10 mA
Résistance initiale à l'état fermé	< 2 Ω
Commutations sous courant 10 μ A/3Vdc - Ron < 10 k Ω	> 100 000 000 cycles
Commutations sous courant 1mA/5Vdc - Ron < 500 Ω	> 1 000 000 cycles
Commutations sous courant 10mA/14Vdc - Ron < 500 Ω	~ 100 000 cycles
Tenue diélectrique entre les contacts	> 100 V _{eff} - 50 Hz - 1 mn
Résistance contacts ouverts	> 100 M Ω à 100 Vdc
Tenue aux chocs électrostatiques (ESD)	+/- 2 kV (IEC 61000-4-2)
Compatibilité électromagnétique (EMC)	Insensible
Performances mécaniques	
Durée de vie mécanique	> 200 000 000 cycles
Temps de commutation (rebonds inclus)	< 100 μ s
Fréquence maximale d'utilisation	1 kHz
Caractéristiques environnementales	
Température de fonctionnement	de -40°C à 100°C
Température de stockage	de -40°C à 150°C
Température de soudure	260°C
Tenue à l'humidité	0% < HR < 95%
Niveau de protection	Hermétique
Choc thermique (IEC 60068-2-30, test Db)	> 2 cycles à 55°C
Cyclage thermique (IEC 60068-2-14, test NA)	> 10 cycles (2h à -40°C, 2h à 100°C)
Température extrême	> 12h à -40°C, suivi de 12h à 150°C

Tableau 8. Performances mesurées du micro-interrupteur vis-à-vis du cahier des charges imposé par les différentes applications.

Les domaines d'utilisation auxquels est destiné le micro-interrupteur vont de l'automobile au médical en passant par les cœurs de métier de Schneider Electric, le contrôle industriel et la distribution électrique. Ceci explique les nombreux critères présents dans le cahier des charges. Cependant, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, le dispositif ne possède pas d'actionnement intégré et son application principale est donc la détection de position. En fonction du domaine d'utilisation, les valeurs de courant et tension utilisées pour détecter un changement de position varient. Ainsi, nous pouvons remarquer dans le tableau précédent que le micro-interrupteur a été testé à trois calibres différents : 3V/10 μ A, 5V/1mA et 14V/10mA. Le dernier calibre de test correspond au marché automobile tandis que le 5V/1mA correspond à une utilisation du composant en automatisme. Le 3V/10 μ A est le calibre utilisé pour les applications de contrôle de

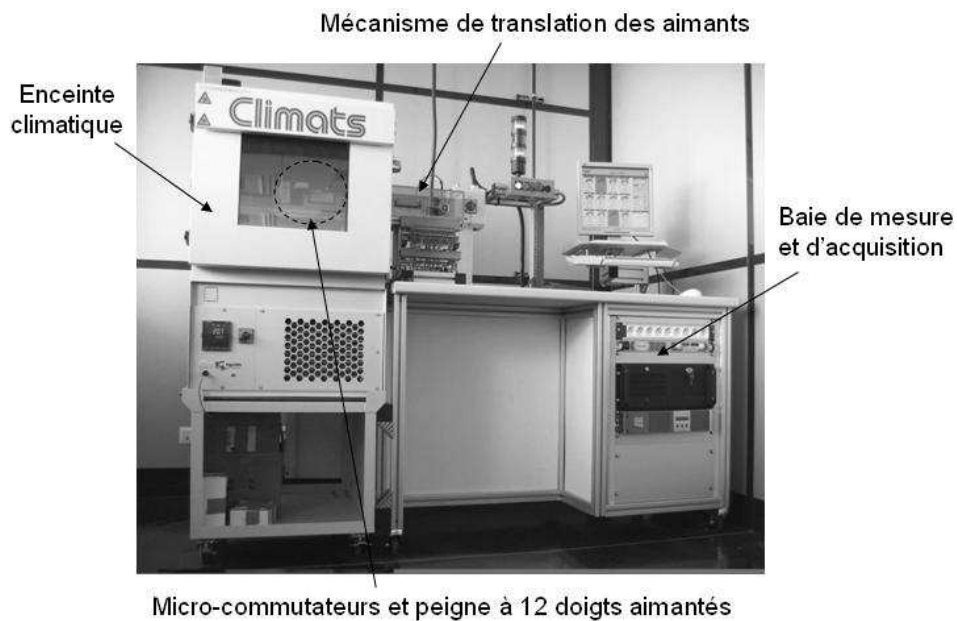
position systématique, ce qui explique le cahier des charges sévère qui impose une durée de vie de plusieurs dizaines de millions de cycles.

Nous allons nous intéresser dans ce chapitre à l'endurance du contact électrique. Nous verrons donc comment évolue le contact électrique lorsqu'il est sollicité aux trois calibres de test précités ainsi que dans le cas d'une sollicitation purement mécanique, sans courant. Nous verrons que la durée de vie du dispositif est limitée par la dégradation du contact électrique. Nous allons surtout chercher à comprendre et analyser les mécanismes de défaillance de ce contact. Commençons par présenter les moyens d'essais et les conditions de test utilisées.

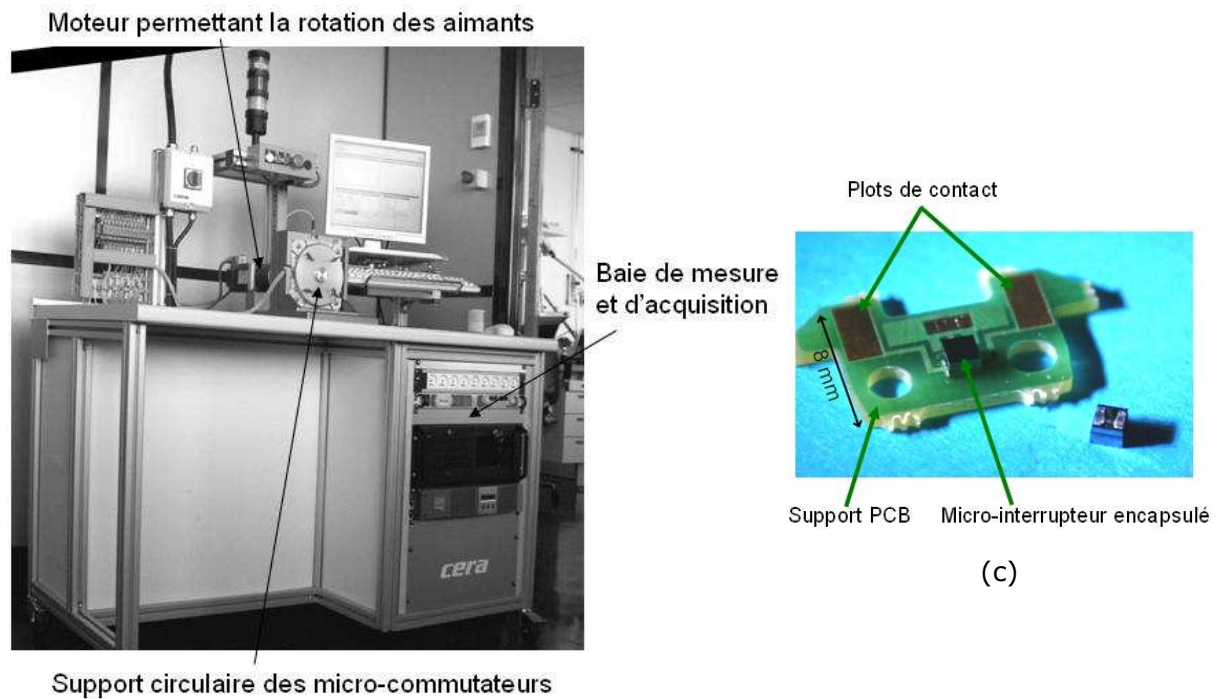
1. Procédure expérimentale

Pour évaluer l'endurance du micro-interrupteur, deux bancs de test présentés sur la Figure 42 ci-dessous ont été développés par Schneider Electric durant le projet. Ces bancs d'endurance ont la même fonction : ils permettent d'actionner de manière répétitive et à différentes fréquences le micro-interrupteur, tout en mesurant la valeur de sa résistance de contact à intervalles réguliers (c'est-à-dire tous les x cycles d'ouverture/fermeture). Les deux bancs diffèrent principalement par leur fréquence maximale de test. Chacun peut tester 12 composants simultanément, ce qui permet d'établir de façon statistique des durées de vie. On entend par durée de vie le nombre de cycles d'ouverture/fermeture que peut subir le composant en conservant des performances en terme de résistance qui seront précisées un peu plus loin.

Pour pouvoir être ainsi testés, les micro-interrupteurs, une fois encapsulés, sont découpés et soudés sur un support en époxy (PCB) permettant de les connecter électriquement au banc de test (Figure 42 – c). Ces deux équipements, présentés sur la Figure 42 ci-dessous, diffèrent principalement par leur fréquence maximale de test.



(a)



(b)

(c)

Figure 42. (a) Banc d'endurance n°1 opérant à une fréquence maximale de 2 Hz. (b) Banc d'endurance n°2 pouvant opérer à 1000 Hz. (c) Micro-interrupteur soudé sur son support époxy.

Le premier banc de test (Figure 42 - a) permet d'atteindre une fréquence maximale d'actionnement de 2Hz tandis que le second (Figure 42 - b) peut fonctionner jusqu'à 1000Hz. Cette différence est liée au dispositif qui permet l'actionnement du micro-interrupteur et à la nature des informations collectées, qui diffèrent largement entre les deux équipements. Leurs caractéristiques sont indiquées dans le Tableau 9. Dans les deux cas l'actionnement des micro-interrupteurs testés est assuré grâce à des aimants mobiles.

L'actionnement par translation d'aimant ne permet pas de travailler à plus de 2Hz, ce qui limite l'utilisation de ce banc de test aux calibres de test les plus sévères, calibres pour lesquels la durée de vie est plus faible. Réaliser un million de cycles à 2Hz nécessite près de 6 jours de test ininterrompus, ce qui est long mais encore acceptable. Valider une endurance de 100 millions de cycles à 3V/10µA, comme le requiert le cahier des charges, nécessiterait par contre presque 600 jours de test à cette fréquence ! Les essais d'endurance aux faibles calibres sont ainsi réalisés sur le second banc de test, avec une fréquence de 1000Hz et requièrent alors quelques jours de test maximum.

Banc d'endurance n°1	
Mode d'actionnement	Aimants en translation
Fréquence maximale de cyclage	2 Hz
Acquisitions	R _{on} et R _{off} à tous les cycles Oscillogramme des cycles défailants
Calibres de test principalement utilisés	5V/1mA et 14V/10mA
Particularités	Enceinte climatique -40°C / 85°C
Banc d'endurance n°2	
Mode d'actionnement	Aimants en rotation
Fréquence maximale de cyclage	1000 Hz
Acquisitions	Contrôle des commutations Mesure R _{on} et R _{off} au début et à la fin du test
Calibres de test principalement utilisés	3V/10µA et Mécanique (0V)

Tableau 9. Caractéristiques générales des deux bancs d'endurance.

Nous remarquons dans le Tableau 9 que les informations collectées durant le cyclage diffèrent en fonction du banc d'endurance. Ainsi, sur le premier banc de test la résistance à l'état fermé (R_{on}) est mesurée à chaque cycle tandis que sur le second banc elle n'est mesurée qu'en début et fin de test. Pour cela, un courant constant égal au courant du calibre de test (1mA ou 10mA) est utilisé et la tension aux bornes du composant est mesurée grâce à une méthode 4 fils. La résistance R_{on} est donc la somme de la résistance de contact, de la résistance du packaging ainsi que de la résistance des pistes et connexions présentes sur le PCB. Nous avons donc

$$R_{on} = R_{Contact} + R_{Packaging} + R_{PCB}$$

Des composants dépourvus de contact électrique (membrane soudée aux pistes) ont été spécialement conçus pour pouvoir mesurer $R_{Packaging}$. De tels composants soudés sur PCB présentent une résistance moyenne $R_{Packaging} + R_{PCB}$ égale à 0.45Ω et qui ne varie pas dans le temps. Ceci nous permet donc d'évaluer précisément la résistance de contact. Cependant la mesure effectuée sur les bancs d'endurance ne soustrait pas cet offset. Les valeurs de résistance présentées dans la suite de ce chapitre sont donc simplement les valeurs R_{on} incluant la résistance de contact, la résistance du packaging et la résistance du PCB⁶.

La fonction principale d'un interrupteur est de laisser passer ou interrompre un signal électrique : le dispositif doit donc pouvoir passer d'un état ouvert à un état fermé

⁶ Il faut rappeler que $R_{Packaging}$ et R_{PCB} ne varient pas dans le temps, même lorsque les composants sont soumis à un courant continu de 1mA ou 10mA pendant plusieurs jours. Les variations de résistance R_{on} mesurées sont donc des variations de $R_{Contact}$.

le plus grand nombre de fois possible. Cette fonction est assortie d'un certain nombre de contraintes ; en particulier le dispositif ne doit pas introduire une chute de potentiel trop importante dans le circuit électrique. Pour cela, la résistance à l'état fermé doit rester dans une gamme de valeurs qui n'altère pas le fonctionnement du circuit. Il convient donc de fixer des critères de défaillance précis sur la valeur de la résistance du composant, critères qui diffèrent en fonction de l'application à laquelle est destiné le composant. Nous évaluerons alors la durée de vie d'un composant en le faisant fonctionner jusqu'à ce qu'il soit défaillant. Le nombre de cycles avant défaillance dépend bien sûr de la sévérité des conditions de test et du critère de défaillance utilisé.

Dans le Tableau 8, chaque calibre de test est associé à un critère de défaillance propre. Nous avons ainsi choisi de déclarer un micro-interrupteur défaillant suite à 3 défauts majeurs durant la totalité du test. Un défaut majeur peut avoir deux natures :

- (1) Non ouverture des contacts
- (2) Résistance à l'état fermé supérieure à une valeur définie :
 - (a) 500Ω pour les calibres 5V/1mA et 14V/10mA
 - (b) $10k\Omega$ pour le calibre 3V/10 μ A

En l'absence de norme dédiée aux micro-relais, tous les tests d'endurance réalisés et présentés dans ce chapitre ont été effectués suivant ces critères inspirés de la norme CEI 60947-5-4 (évaluation des performances des contacts à basse énergie dans l'appareillage basse tension). Le but de ce travail est de comprendre les mécanismes de défaillances et d'identifier les paramètres entrant en jeu dans la dégradation du contact électrique. Il sera donc important d'observer le comportement du micro-interrupteur tout au long des tests d'endurance indépendamment des critères énoncés précédemment.

2. Tests d'endurance mécanique

Lorsque le micro-interrupteur est actionné à vide, sans avoir à interrompre de signal, on parle de cyclage mécanique. Aucun courant ne circule dans le dispositif, à l'exception du courant de mesure utilisé pour caractériser la résistance initiale. Dans ces conditions, une série de douze micro-interrupteurs ont été actionnés 200 millions de fois et la structure mécanique des dispositifs est toujours parfaitement fonctionnelle. Par conception les bras de torsion sont dimensionnés pour se déformer élastiquement lors du mouvement de la membrane et effectivement, à l'issue de ce test aucune déformation ou rupture des bras de torsion n'a été observée. De plus, à ces échelles micrométriques, les matériaux présentent très peu de défauts structurels, propices à l'apparition de défaillances mécaniques, comme nous l'avons vu dans le chapitre 1.

La durée de vie du micro-interrupteur n'est donc pas limitée par la défaillance de sa structure mécanique. La comparaison des résistances à l'état fermé (R_{on}) et ouvert (R_{off}) en début et fin de test révèle cependant que ce cyclage a eu une incidence sur le contact électrique. Les deux matériaux de contact, l'or et le ruthénium ne se comportent toutefois pas de la même façon.

2.1. Contacts en or

Initialement la résistance de contact des micro-interrupteurs à contact doré est proche de l'ohm. Deux séries de 12 composants ont été testés et à l'issue de 100 millions de cycles

mécaniques la valeur est sensiblement la même. Cependant certains composants ne s'ouvrent plus, le contact mobile et le contact fixe semblent collés ensemble. La structure mécanique du commutateur n'est pas mise en cause, une observation au microscope électronique à balayage (MEB) des contacts à l'issue du test est donc nécessaire. La Figure 43 présente une observation typique des contacts d'un des micro-interrupteurs testés.

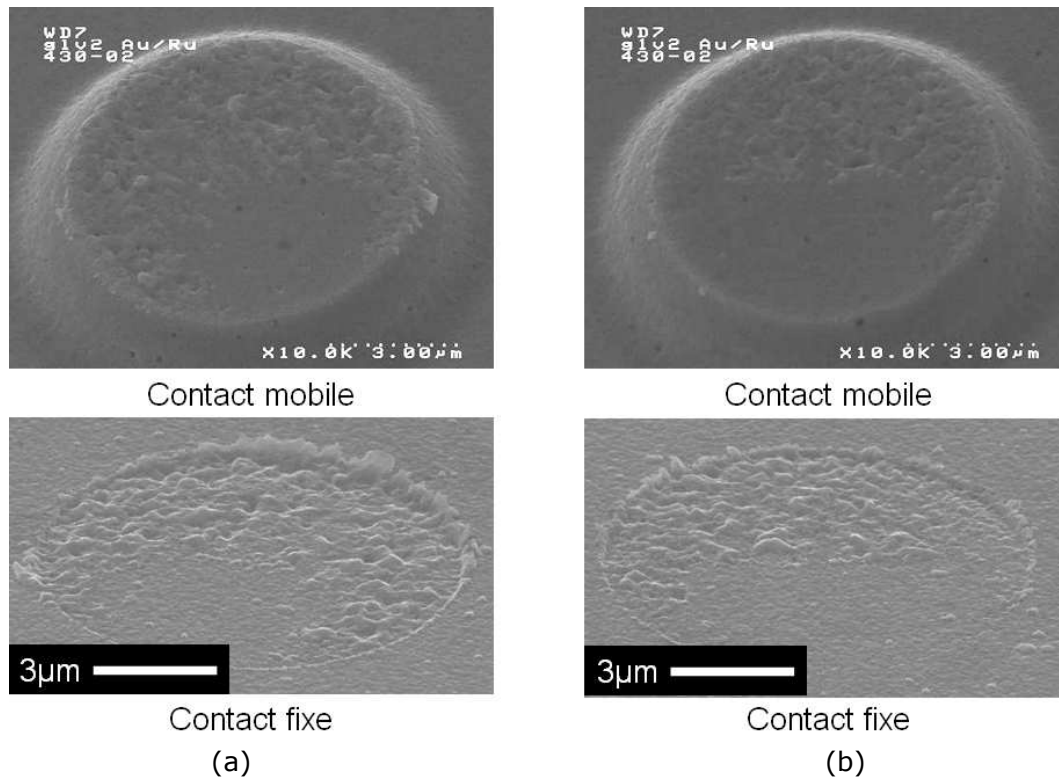


Figure 43. Observation MEB des contacts dorés à l'issue de 100 millions de cycles mécaniques. (a) Contact gauche. (b) Contact droit.

Nous remarquons que la rugosité a fortement augmenté, la surface semble avoir été remaniée au cours du cyclage. Un tel comportement a été largement modélisé par un groupe de recherche de la Yeshiwa University [Song2008, Fortini2008] dans des conditions de force et de surface de contact similaires. Les comportements des revêtements d'or et de ruthénium ont été modélisés en vue d'applications dans des micro-interrupteurs MEMS. Il a ainsi été montré par Song et Fortini que lors de l'ouverture de contacts dorés un pont métallique se forme et sa rupture est ductile, engendrant d'importantes modifications topographiques. Inversement, lors de l'ouverture de contacts en ruthénium, la rupture est fragile, générant beaucoup moins de modifications topographiques. La formation d'un pont métallique lors de l'ouverture d'un contact en or a été, de plus, déjà mis en évidence expérimentalement [Erts2002, Patton2005].

Indépendamment de ces observations récentes et micrométriques, ce phénomène d'écrouissage du contact est connu depuis l'époque de Holm [Holm1967, Angus1969]. Il est lié aux phénomènes d'adhésion entre deux surfaces propres que nous avons présentés dans le chapitre 1. Pour une géométrie et une rugosité des surfaces données, le phénomène est proportionnel à la force de contact appliquée et à la dureté du

matériau. Ainsi, pour limiter l'adhésion, l'utilisation d'un matériau dur et avec une faible ductilité est préférable tout comme l'application d'une force de contact faible.

La dégradation des surfaces que nous observons sur l'or a donc déjà été observée sur des contacts macroscopiques. Elle n'est toutefois pas particulièrement pénalisante dans notre cas, la résistance de contact restant de l'ordre de l'ohm. Cependant certains micro-interrupteurs ont fini définitivement collés à l'issue du test, ce qui est une cause de défaillance majeure. L'utilisation de l'or en tant que matériau de contact ne permet donc pas d'assurer une fiabilité optimale dans ces conditions de test. Notons toutefois que ce test a été effectué avec une force de contact maximale ($\sim 300\mu\text{N}$ par contact), ce qui amplifie ce phénomène de collage à froid. Le même test a alors été mené avec la force utilisée habituellement ($\sim 150\mu\text{N}$ par contact) et aucune défaillance par collage n'a été observée. La force de contact est donc un paramètre prépondérant dans le cas d'un cyclage mécanique. Examinons maintenant le cas du ruthénium, qui compte tenu des remarques précédentes, devrait mieux se comporter mécaniquement.

2.2. Contacts en ruthénium

Une série de 12 micro-interrupteurs dotés de contacts recouverts de 100 nm de ruthénium a subi le même test d'endurance mécanique (100 millions de cycles). La résistance initiale des dispositifs est comprise entre 1.5Ω et 2Ω . A l'issue du test, aucun micro-interrupteur n'est défaillant par collage des contacts mais en revanche leur résistance a sérieusement augmenté. Sur la série des dispositifs testés, les résistances de contact à l'issue du test sont toutes comprises entre 10 et plusieurs milliers d'ohms. Le comportement est donc totalement différent de celui des contacts dorés et une observation MEB des zones de contacts peut nous permettre d'avancer une explication (cf. Figure 44).

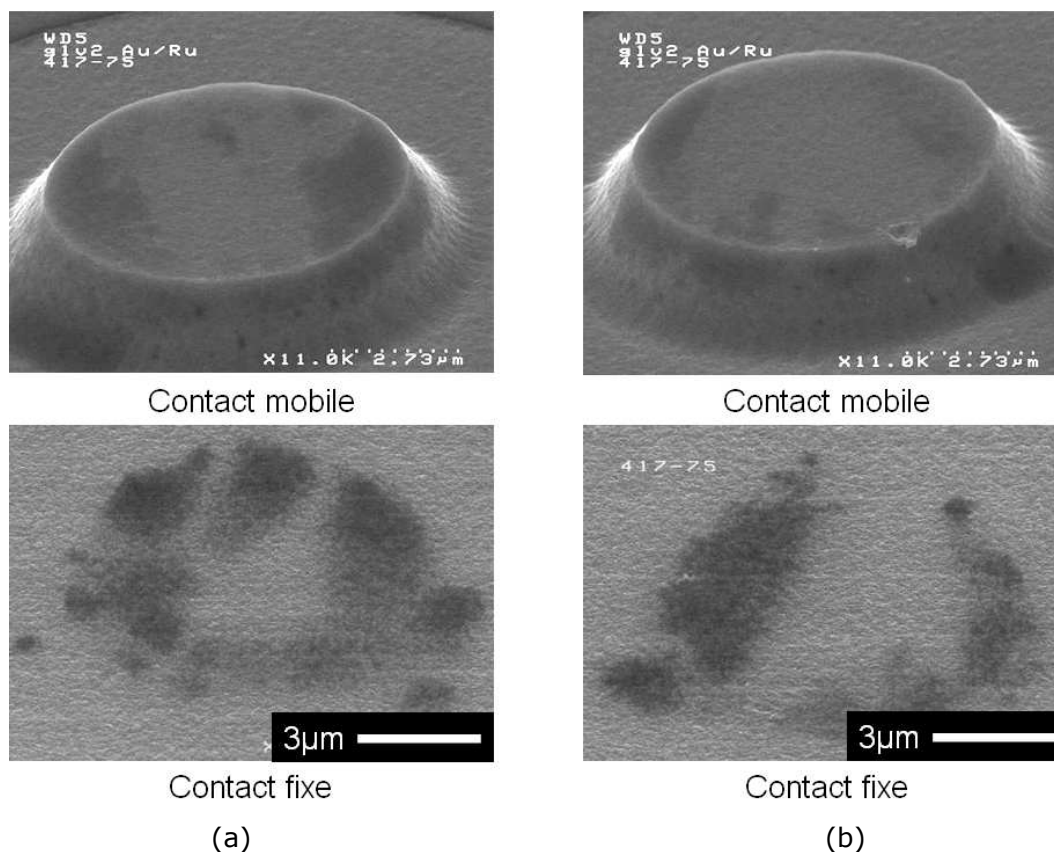


Figure 44. Observation MEB des contacts recouverts de ruthénium à l'issue de 100 millions de cycles mécaniques. (a) Contact gauche. (b) Contact droit.

Ces observations MEB nous révèlent qu'aucune modification topographique majeure n'a eu lieu, à l'inverse de ce qui se produit pour l'or. Les simulations citées précédemment semblent donc en accord avec nos observations : le ruthénium résiste beaucoup mieux à l'écrouissage. Cependant nous remarquons qu'une couche sombre est apparue sur les zones de contact, couche qui n'était pas présente au début du test. L'apparition de telles taches lors de tests d'endurance mécanique sur des micro-contacts a déjà été observée lors de l'utilisation d'alliages Au-Ru et des analyses EDX (Energy Dispersive X-Ray Analysis) de leurs surfaces noirâtres ont alors révélé qu'il s'agissait principalement de carbone [Chen2007]. Nous avons procédé à des analyses EDX de nos différentes surfaces et les graphes sont présentés sur la Figure 45 ci-après.

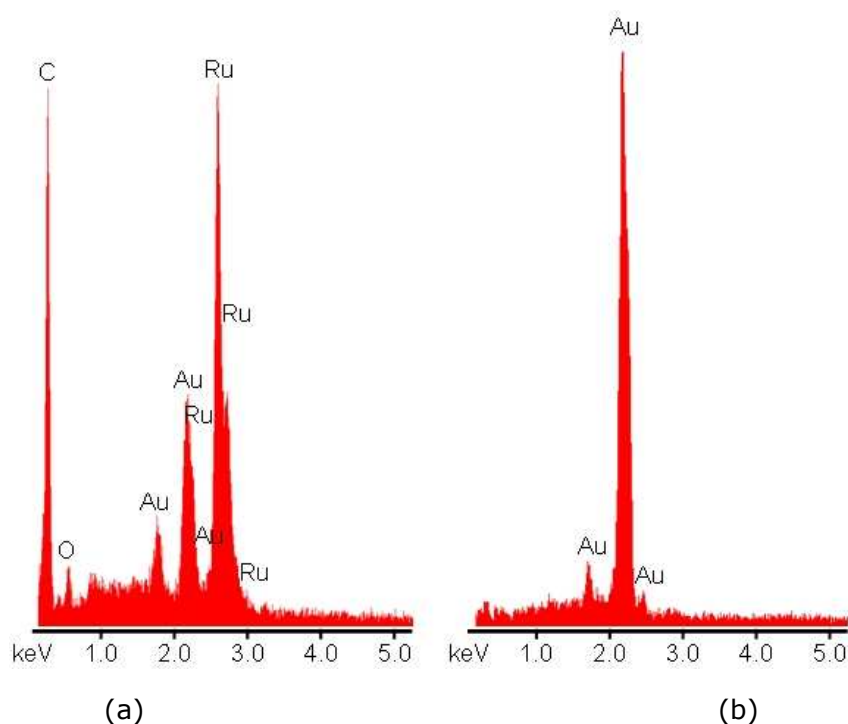


Figure 45. Spectres d'analyse EDX (identiques avant et après cyclage mécanique).
(a) Contact recouvert de ruthénium. (b) Contact doré.

Les analyses ont été effectuées avec une énergie de faisceau de 15keV (seules les données récoltées sur les 5 premiers keV sont rapportées sur la Figure 45), ce qui correspond à une profondeur d'analyse de l'ordre de 200nm. Pour les contacts recouverts de ruthénium, l'analyse des surfaces dans les zones noirâtres après cyclage fournissent le spectre (a) qui révèle la présence de carbone sur les surfaces en quantité non négligeable.

L'analyse des surfaces de ruthénium avant cyclage fournit un spectre identique (présence de carbone) tandis qu'un contact doré avant cyclage fournit le spectre (b) qui ne présente aucun pic lié à la présence de carbone⁷. La comparaison de ces deux spectres révèle que le ruthénium à l'état initial est beaucoup plus contaminé que l'or. Une telle observation a déjà été faite lors de l'étude de micro-interrupteurs possédant des contacts en or et en ruthénium [Ke2008].

Cette contamination carbonée présente sur les surfaces provient vraisemblablement du procédé de fabrication qui met en jeu de nombreuses solutions organiques, des résines et des gaz organiques. Cette contamination ne pose pas de problème sur l'or lors des cyclages mécaniques principalement car ce dernier a une activité catalytique très faible comparée à celle du ruthénium. En effet, le ruthénium, comme tous les matériaux du groupe platine, est un matériau catalytique très actif. Il a été observé, dès les années 50, l'apparition de contamination carbonée lorsque des contacts de ce type sont testés en présence de vapeurs organiques, même dans des conditions de cyclage purement mécanique [Hermance1958]. L'analyse de cette contamination révèle qu'elle est un mélange complexe de matériaux réticulés, de masse moléculaire élevée [Reagor1981],

⁷ L'analyse EDX n'est pas assez précise pour détecter le carbone dans ce cas-là, du carbone est présent sur les surfaces d'or, la suite du chapitre nous le confirmera.

d'où le nom de « polymères de friction », le terme « friction » étant discutable, nous le verrons plus loin.

Le mécanisme de formation de ces polymères de friction n'a jamais été précisément décrit et les cas présentés ci-dessus diffèrent légèrement du nôtre. La source des contaminants carbonés dans un commutateur classique est en effet gazeuse et provient du dégazage des parties plastiques du dispositif. Dans notre cas, cependant, le micro-interrupteur ne possède aucune partie plastique, et l'analyse des gaz résiduels présents dans la cavité du packaging révèle la présence de composés hydrocarbonés en quantité infime (20 ppm) [Hymite2005]. Cependant des analyses de l'extrême surface des contacts ont été réalisées par spectroscopie ToF-SIMS⁸ et révèlent la présence de contamination carbonée sur les contacts en or (cf. Figure 46). Les contacts en ruthénium ayant suivi les mêmes étapes de fabrication, nous pouvons supposer que les mêmes contaminants sont présents sur sa surface, et sans doute en quantités encore plus importantes puisque le carbone est détectable lors des analyses EDX (cf. Figure 45).

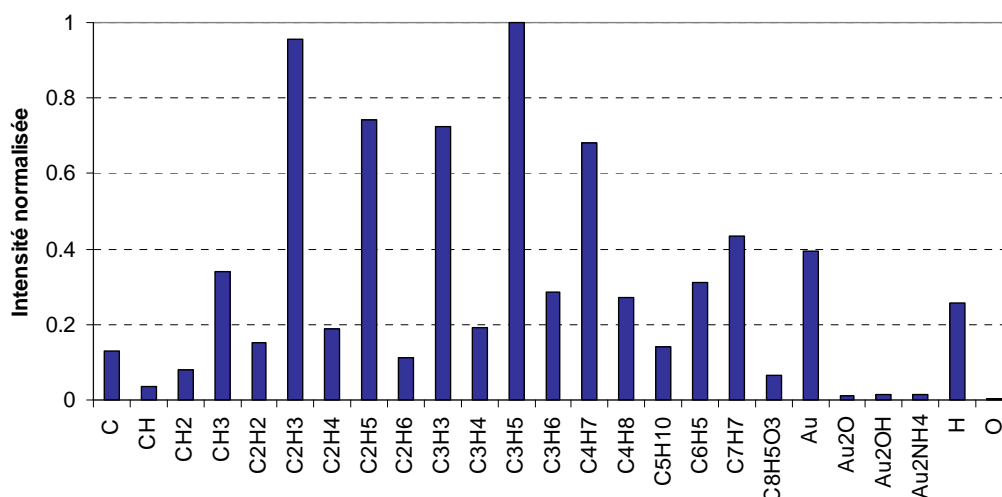


Figure 46. Analyse ToF-SIMS des surfaces de contact dorées.

De nombreuses molécules hydrocarbonées du type C_xH_y sont présentes sur les surfaces de contact. L'ensemble de ces molécules sont des alcanes insaturés (alcènes), c'est-à-dire que leur structure moléculaire est incomplète. Ils possèdent donc de nombreuses liaisons pendantes ou des doubles liaisons propices à des recombinaisons. En particulier, lorsqu'une molécule s'adsorbe sur une surface catalytique, une liaison covalente se crée, au détriment d'une liaison interne de la molécule. La molécule ainsi adsorbée est donc plus réactive, prête à se recombinaison avec la molécule la plus proche. La présence d'hydrogène en quantité non négligeable (4%) dans l'atmosphère du packaging peut permettre des réactions d'hydrogénation des alcènes présents sur les surfaces, générant des molécules de masse moléculaire plus élevée [Bruckner1999].

Toutes les conditions semblent donc réunies pour que de nombreuses recombinaisons entre les molécules carbonées présentes sur nos surfaces se produisent. Le mécanisme

⁸ ToF-SIMS : Spectrométrie de Masse d'Ions Secondaires à Temps de Vol (Time of Flight – Secondary Ion Mass Spectroscopy) est une technique permettant l'analyse de l'extrême surface des matériaux (<0.5nm). Présentation intéressante : <http://www.sciencefrance.com/techniques/ToF-SIMS/ToF-SIMS.html>

de formation de ces polymères de friction n'est cependant toujours pas connu [Asay2008] mais une certitude existe : l'action mécanique du contact sur la surface est indispensable à la formation de ces polymères. Le mouvement du contact mobile sur le contact fixe va avoir une action triple, il va :

- (1) nettoyer les sites catalytiques et donc permettre de nouvelles adsorptions et recombinaisons,
- (2) rompre les liaisons de certaines molécules et donc favoriser les recombinaisons,
- (3) déplacer ces molécules en dehors de la zone d'impact et donc favoriser leur recombinaison avec des molécules initialement éloignées.

De proche en proche des molécules carbonées simples se recombinent et forment au final un matériau polymère constitué de nombreuses chaînes réticulées. Hermance et al. ont ainsi réussi à reproduire des polymères de friction en partant de simples vapeurs de benzène (C_6H_6), démontrant qu'un mécanisme de polymérisation en chaîne se produit. Abbott et al. [Abbott1978] ont quant à eux montré qu'aucun mouvement de glissement n'était nécessaire, le simple choc des contacts suffisant pour faire apparaître de tels polymères. Notons qu'une solution pour s'affranchir de ce problème de ces polymères a été apportée par les fabricants de relais reed dans les années 1970 en procédant à l'oxydation des surfaces de leurs contacts en rhodium [Yokogawa1973]. Cette oxydation a pour effet de rendre la surface inerte en formant un oxyde Rh_2O_3 [Yokogawa1986].

Nous avons donc reproduit lors de nos tests sur des micro-contacts un mécanisme de défaillance jusqu'ici observé sur des contacts macroscopiques. Ce mode de défaillance peut se révéler rédhibitoire pour l'utilisation du ruthénium en tant que matériau de contact. Nous reviendrons sur ce point dans la partie traitant des tests d'endurance sous 5V/1mA. Notons que l'absence d'une telle contamination sur les contacts en or est logique, l'or étant un matériau à l'activité catalytique faible.

Ces tests d'endurance, très simples car purement mécaniques, révèlent déjà que les deux matériaux de contact que nous avons choisis ont des comportements très différents. Les mécanismes de défaillance du micro-contact électrique sont donc, comme pour les contacts macroscopiques, liés non seulement au calibre de test, mais aussi à la nature du matériau de contact. La compréhension des mécanismes de défaillances n'est donc pas aisée. Le prochain paragraphe traite alors directement du cas de l'endurance sous 5V/1mA. L'endurance sous 3V/10 μ A sera traitée par la suite, les défaillances observées dans ces conditions étant une combinaison des défaillances observées en endurance mécanique et sous 5V/1mA.

3. Tests d'endurance sous 5V / 1mA

L'ensemble de ces essais est réalisé avec une fréquence de test de 2Hz, le micro-interrupteur établissant et interrompant à chaque cycle une tension continue de 5V et un courant limité à 1mA à l'aide d'une résistance de 5k Ω . Ce type de test est appelé en anglais « *hot switching* » et est représentatif d'une utilisation réelle du dispositif, qui comme son nom l'indique sert à commuter un circuit en charge (par opposition avec les tests de « *cold switching* » pour lesquels la commutation s'effectue à vide).

3.1. Contacts en or

3.1.1. Mise en évidence des modes de défaillances

Plusieurs séries de 12 micro-interrupteurs ont été testées dans ces conditions, les tests étant généralement arrêtés à l'issue d'un million de cycles. Les deux polarités ont été étudiées, à savoir la polarité dite « M- » où le contact mobile est polarisé négativement (cathode) tandis que le contact fixe est polarisé positivement (anode), et la polarité inverse dite « M+ ». Nous verrons que la polarité peut avoir une influence sur la durée de vie ainsi que sur les mécanismes de défaillance associés.

Au premier abord, tous les dispositifs testés semblent se comporter d'une façon différente durant le cyclage et il est donc difficile de présenter un cyclage typique. Il est toutefois possible d'extraire trois grandes familles de comportement pour chaque polarité, et la Figure 47 ci-après présente l'évolution de la résistance R_{on} en fonction du nombre de cycles pour six dispositifs représentatifs de ces trois tendances. Dans ce cas, la résistance est mesurée tous les cycles mais nous ne représentons qu'une valeur tous les 1000 cycles, cette valeur étant la valeur maximale enregistrée sur l'intervalle de 1000 cycles.

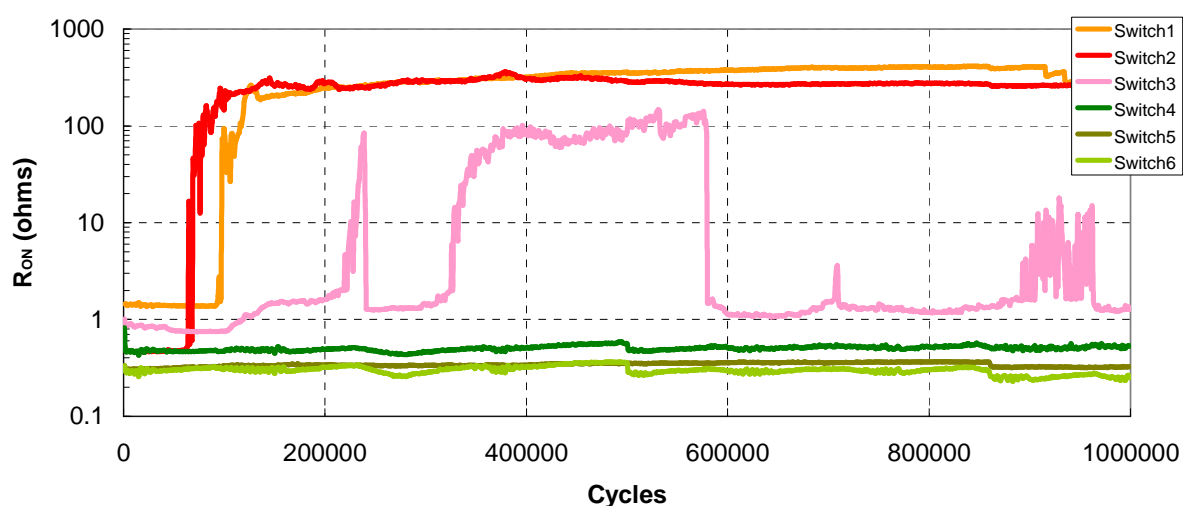


Figure 47. Exemples typiques d'évolution de la résistance des micro-interrupteurs en fonction du nombre de commutations effectuées sous 5V/1mA.

Trois comportements principaux peuvent être identifiés :

- (1) Les dispositifs 1 et 2 qui présentent une brusque augmentation de résistance durant les 100000 premiers cycles. La résistance se stabilise ensuite à un niveau de 200 – 300 Ω .
- (2) Le composant 3 qui a une résistance qui augmente temporairement à 200 – 300 Ω puis peut retrouver sa valeur initiale.
- (3) Les composants 4 à 6 dont la résistance reste basse et globalement stable tout au long du cyclage.

Dans la polarité M-, plus de la moitié des composants présentent un comportement de type (1) ou (2). Dans la polarité M+, par contre, 75% des composants présentent un

comportement de type (3) et les 25% restants un comportement de type (2). Quasiment aucun composant dans cette polarité ne présente un comportement de type (1).

Nous allons voir que différents types de dégradations sont observés sur les surfaces des contacts à l'issue de ces tests d'endurance. Ces différences dans la nature des dégradations du contact permettent d'expliquer les comportements observés en figure 6. En particulier, les analyses MEB des zones de contact à l'issue des tests d'endurance nous apprennent que dans plus de la moitié des cas, un seul contact est dégradé, le second est intact. Lorsque le contact est dégradé, les surfaces peuvent présenter :

- (1) Un monticule de matière ou un enlèvement de matière.
- (2) Un voile de couleur sombre sur et autour de ces reliefs.
- (3) Dans peu de cas, des particules détachées de la surface.

Commençons par examiner le profil de dégradation n°1 : la présence de monticules de matière ou de creux sur la surface des contacts. Nous nous intéresserons ensuite au cas n°2, le cas n°3 sera étudié plus en détails dans le paragraphe traitant des contacts recouverts de ruthénium.

3.1.2. Transferts de matière

Lorsqu'un monticule de matière est observé sur un des membres du contact, il s'accompagne d'un cratère de taille et de forme similaires sur le contact opposé, témoignant d'un transfert de matière d'une électrode vers l'autre. Lorsque la polarité est inversée, la direction de ce transfert de matière change aussi, le transfert de matière s'opérant alors toujours de l'anode vers la cathode. L'anode perd de la matière tandis que la cathode en gagne, la Figure 48 ci-après illustrant ce propos.

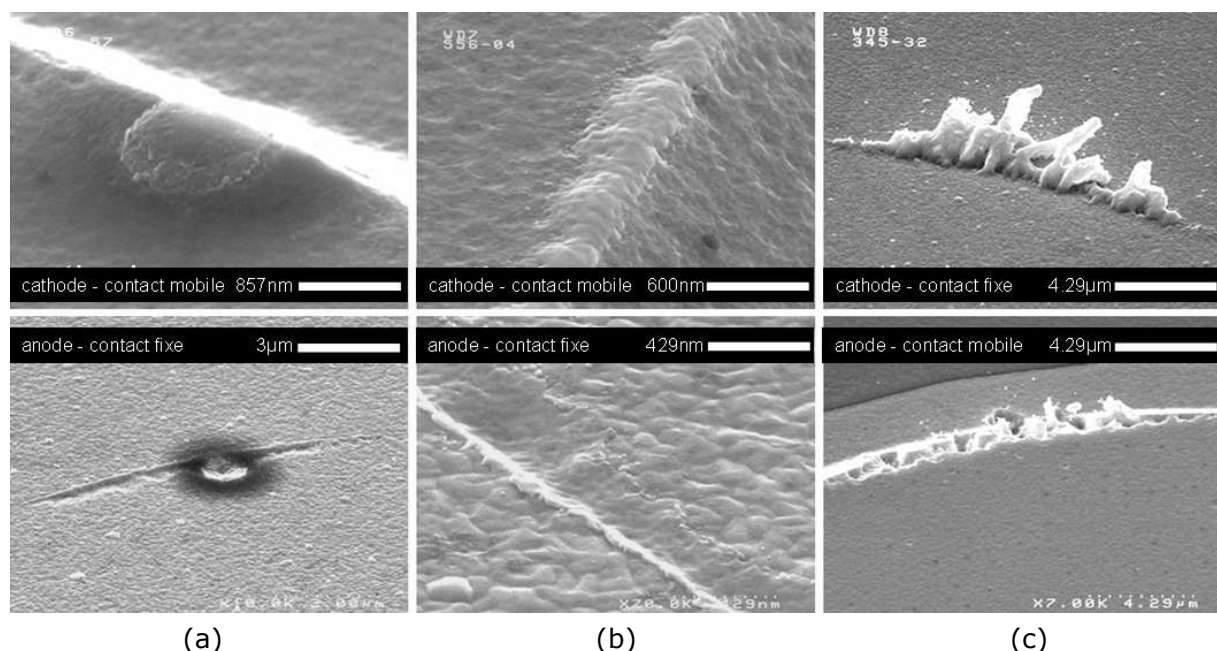


Figure 48. Observation MEB des transferts de matière observés sur des éléments de contact dorés à l'issue d'un million de commutations sous 5V/1mA.

Un tel transfert de matière, se comportant identiquement vis-à-vis de polarité, a déjà observé par Z. Yang dans des conditions de courant/tension similaires [Yang2008]. Ce phénomène, aux faibles valeurs de tension et courant auxquelles nous opérons, reste

cependant inexpliqué à ce stade. Nous aborderons le transfert de matière par émission électronique au chapitre 4. Les cas (a) et (b) ne diffèrent que par la présence d'un voile noirâtre, voile qui sera examiné dans le paragraphe concernant l'apparition de contamination carbonée. Le cas (c) semble différent, des grains entiers du matériau de contact ont été arrachés de l'anode. Ce phénomène est cependant toujours dirigé de l'anode vers la cathode, il est donc possible qu'il s'agisse simplement d'une manifestation plus intense du phénomène engendrant les transferts de type (a) et (b). Un échauffement local important associé au mouvement de séparation des deux contacts peut aussi avoir pour effet d'arracher un grain entier. L'arrachement peut alors se produire au niveau des joints de grains, zones toujours plus fragiles dans un matériau.

Une modification de la topographie est aussi observée régulièrement à l'issue des tests d'endurance. Ce cas est très différent des observations que nous venons de réaliser, dans le sens où le monticule de matière est la plupart du temps observé sur le contact fixe (quelle que soit la polarité) et que le contact opposé ne présente pas de cratère de la taille du monticule. Il ne s'agit donc pas d'un transfert de matière comme dans le cas précédent, nous allons voir qu'il s'agit d'un « *hillock*⁹ », monticule dont l'apparition est liée à l'élévation de température générée par le passage du courant et aux contraintes présentes dans la couche d'or.

3.1.3. Croissance d'*hillocks*

La figure 8 ci-après présente l'analyse dimensionnelle d'un tel monticule. Nous remarquons grâce à des mesures réalisées au MEB que le monticule mesure environ 1µm de diamètre et 750nm de haut (cf. Figure 49 – a). Le contact opposé présente un cratère du même diamètre mais d'une profondeur de moins de 100 nm (Figure 49 – b). La matière composant ce monticule ne provient donc pas du contact opposé, comme c'était le cas pour les monticules de la Figure 48.

⁹ Trouver une traduction élégante du terme « hillock » est difficile. Monticule ? Butte ? Bosse ? Littérairement parlant un « hillock » est une colline isolée, image qui colle parfaitement au phénomène que nous observons. Nous utiliserons donc le terme « hillock » dans la suite du manuscrit, par simplicité et pour faciliter les éventuelles recherches bibliographiques futures.

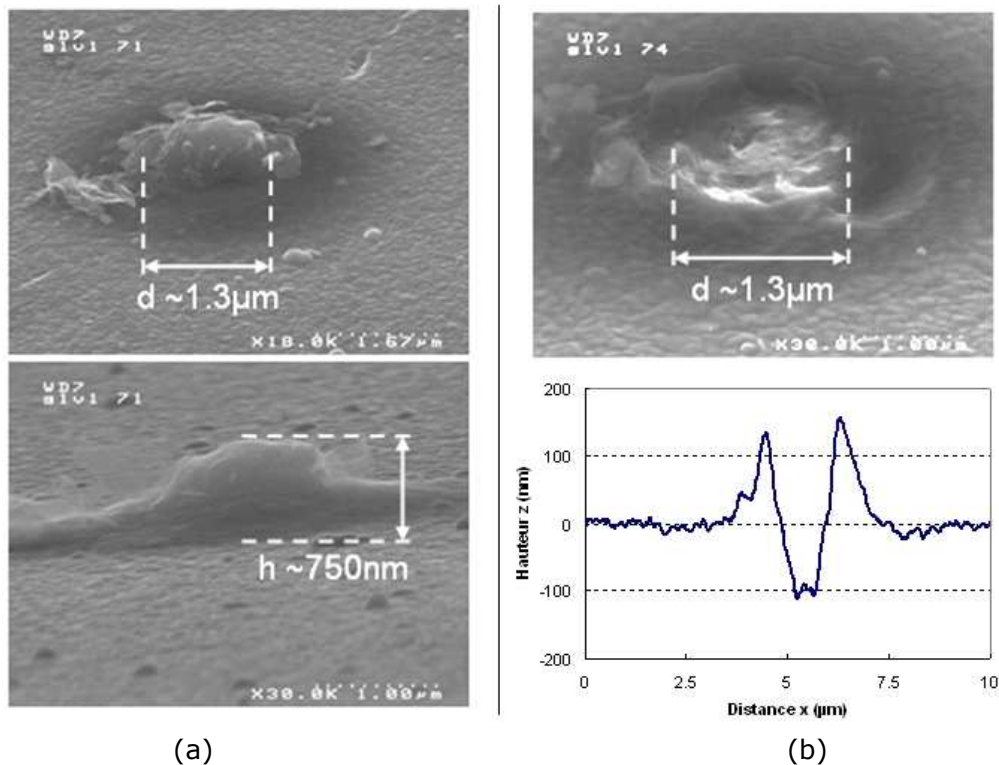


Figure 49. Analyse dimensionnelle (a) d'un hillock sur l'élément de contact fixe et (b) de la zone de contact sur l'électrode opposée (mobile).

Ce monticule de matière, qui n'était pas présent au début du cyclage, est interprété comme étant un *hillock* apparu sous l'effet de l'élévation de température liée au passage du courant. La formation de tels monticules lors de recuits effectués sur des couches minces métalliques a déjà été rapportée à maintes reprises [Pennebaker1969, LaCombe1982, Kim1990, Kim2000]. Ce phénomène est lié à l'apparition de contraintes compressives dans le plan du film sous l'effet de la température. Les coefficients de dilatation du film métallique et des matériaux présents en dessous sont en effet rarement identiques, et sous l'effet de la température des contraintes apparaissent. Ces contraintes, lorsqu'elles sont compressives, engendrent un soulèvement de la couche mince, mais aussi une diffusion d'atomes à l'interface substrat/film métallique. Par un phénomène de nucléation et de croissance, un grain métallique se forme progressivement jusqu'à rompre le film et apparaître à la surface [Kim2000]. Kim et al. ont ainsi procédé à des recuits à 450°C de films d'aluminium de 1 μm d'épaisseur déposés sur un wafer de silicium oxydé et fait apparaître des *hillocks* de 4 μm de hauteur et de diamètre. L'observation d'un tel *hillock* suite à une coupe transversale au FIB mérite d'être présentée et illustre très bien ce phénomène de croissance (cf. Figure 50).

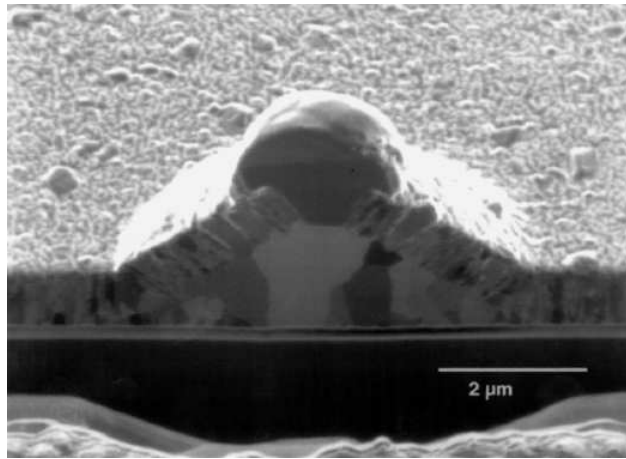


Figure 50. Vue en coupe d'un hillock sur une couche mince d'aluminium déposée sur Si/SiO₂ [Kim2000].

Pour vérifier que l'apparition de tels monticules est bien liée à la présence de contraintes compressives, des travaux ont été menés en appliquant directement une contrainte mécanique sur un échantillon recouvert d'un film métallique [Lahiri1994, Cheng2008]. Les résultats obtenus sont en tous points identiques à ceux obtenus en procédant à des recuits à haute température, validant ainsi l'influence des contraintes sur la croissance des *hillocks*.

Dans notre cas, aucun monticule n'était initialement présent sur la surface de l'élément de contact fixe (cf. Figure 51 - a), mais nous avons observé l'apparition d'*hillocks* suite au procédé de packaging qui nécessite des températures de l'ordre de 300°C pour assurer le scellement eutectique du capot (Figure 51 - b). Il faut noter qu'aucun *hillock* n'est présent sur le ruthénium, phénomène déjà observé lorsque divers matériaux sont déposés sur des couches minces d'or [LaCombe1982, Etzion1975]. Nous avons alors effectué des recuits à différentes températures sur des échantillons témoins et dès 200°C des *hillocks* apparaissent sur les surfaces d'or (cf. Figure 51 - c), phénomène encore plus marqué à 350°C (cf. Figure 51 - d).

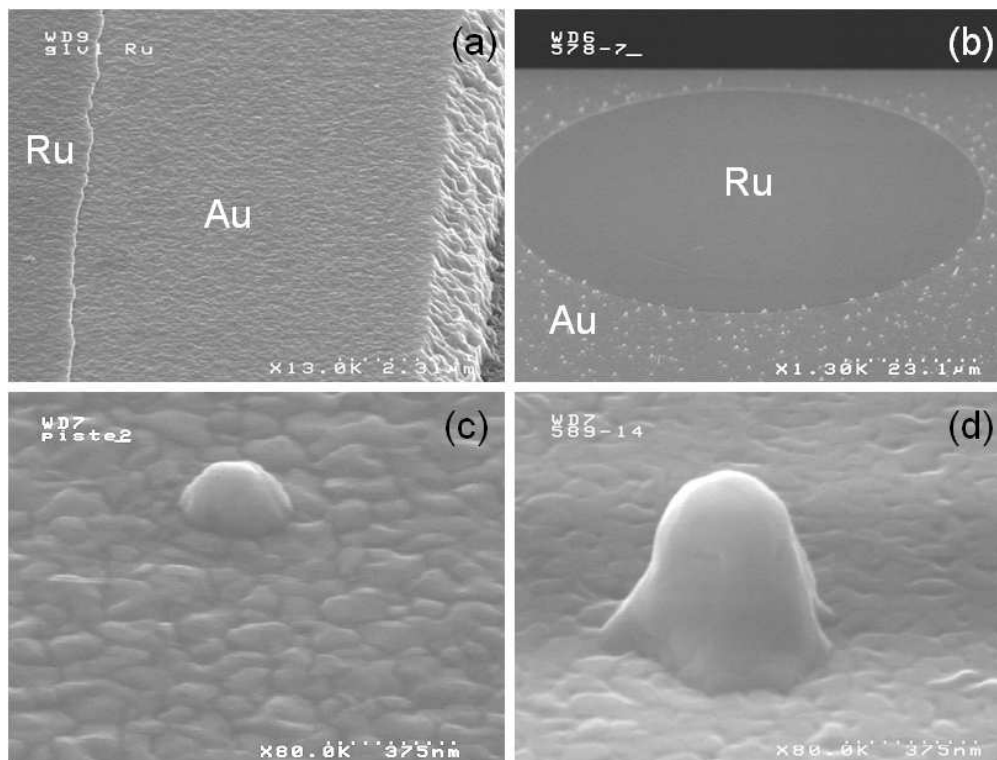


Figure 51. Apparition d'hillocks suite aux recuits.
 (a) Etat initial du contact fixe. (b) Contact fixe après packaging. (c)-(d) Croissance d'hillock suite à un recuit de 2h à 200°C (c) et 350°C (d).

Un autre phénomène peut être à l'origine de l'apparition d'hillocks : l'électromigration. L'électromigration est un phénomène de transport d'atomes dans des conducteurs métalliques sous l'effet d'une forte densité de courant. Il est bien connu –notamment car il s'agit du mode de défaillance principal des interconnexions dans les circuits intégrés– que sous l'effet de densités de courant de l'ordre de 10^5 A/cm² des déplacements de matière sont observés [Tan2007]. Dans le cas de couches minces d'or, de la matière est déplacée de la cathode vers l'anode. Ce déplacement de matière a pour effet de créer des vides (« voids ») du côté de la cathode et une accumulation de matière sur l'autre électrode. Cette accumulation de matière génère des contraintes compressives dans le film, contraintes qui se manifestent alors par l'apparition d'hillocks [Klein1973, Etzion1975, Zhang2008].

Dans notre cas le courant est faible, 1mA, mais les observations MEB que nous venons d'étudier permettent d'estimer que le rayon de la zone de contact utile est de l'ordre de plusieurs centaines de nanomètres. Une zone de contact aussi réduite engendre une densité de courant de $10^5 - 10^6$ A/cm², condition propice à l'apparition de phénomènes d'électromigration. Il est donc possible que le passage du courant entraîne de tels phénomènes au sein du film d'or et donc l'apparition d'hillocks. Notre cas est toutefois légèrement différent, nous ne sommes pas en présence d'un conducteur continu. Ainsi, si un tel phénomène était à l'origine des monticules que nous observons, les hillocks devraient apparaître préférentiellement sur l'anode. Or dans 90% des cas, les monticules observés apparaissent sur le contact fixe, quelle que soit la polarité.

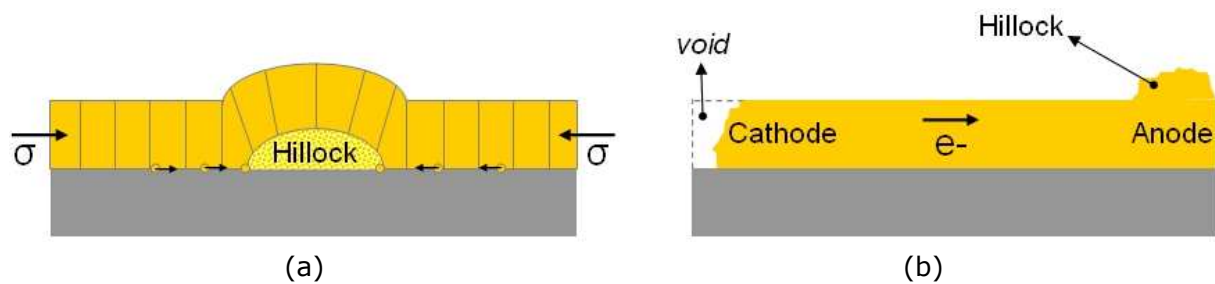


Figure 52. Mécanisme de croissance des hillocks.
(a) Par contrainte compressive et (b) par électromigration.

Le mécanisme de croissance d'*hillocks* au cours des tests d'endurance n'est donc pas clairement identifié, deux origines existent et la Figure 52 ci-dessus les illustre. L'échauffement local engendré par le passage du courant peut entraîner leur croissance, mais l'électromigration induite par les fortes densités de courant mises en jeu est une hypothèse à ne pas écarter. Toutefois, leur apparition s'accompagne dans la totalité des cas de contamination carbonée. La décomposition des contaminants présents en surface peut être activée par l'élévation de température locale que nous venons de considérer. Cependant il est possible aussi que cette contamination carbonée soit liée à une diffusion des contaminants organiques présents au sein du matériau vers la surface. Nous montrerons dans le paragraphe suivant que cette contamination est isolante, engendrant des résistances de contact de plusieurs centaines d'ohms. L'échauffement local généré par effet Joule au travers de ce film isolant est alors amplifié. La formation de ces *hillocks* est alors probablement le résultat d'un emballement thermique lié à l'augmentation de résistance engendrée par l'apparition de la couche de contamination carbonée.

Les hypothèses quant à l'apparition de ces monticules sont donc encore nombreuses, mais, quoi qu'il en soit, un examen plus détaillé d'un monticule observé sur nos contacts confirme que le phénomène observé est bien la croissance d'*hillocks* (cf. Figure 53 ci-dessous). La matière semble sortir de la couche d'or sous forme d'un grain, observation tout à fait semblable à celle présentée en Figure 50. Dans notre cas le sommet du monticule semble avoir été arraché, et nous verrons dans le paragraphe concernant le ruthénium que cet arrachement est à l'origine des particules errantes retrouvées sur les zones de contact.

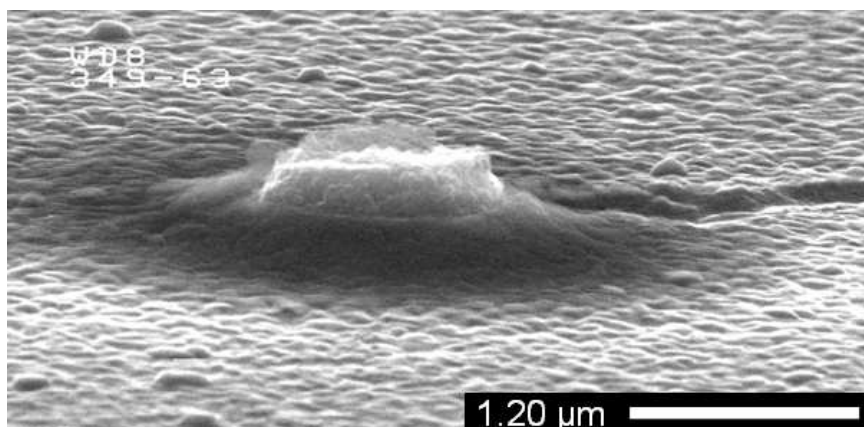


Figure 53. Observation MEB d'un hillock apparu durant les tests d'endurance sous 5V/1mA.

L'apparition de ces *hillocks*, à l'inverse des transferts de matière anode-cathode observés, ne s'accompagne pas d'un cratère du même volume que l'*hillock* sur le contact opposé. Nous verrons alors dans le paragraphe 3.1.5 que ceci engendre un déséquilibre important entre les deux contacts, tant et si bien que le second contact, même s'il est intact, ne peut plus se fermer.

3.1.4. Apparition de contamination carbonée

Des analyses EDX ont été menées sur les zones noirâtres que nous avons observées sur la plupart des contacts à l'issue des tests d'endurance (zone 2 sur la Figure 54). A titre de comparaison, des analyses en dehors de la zone de contact (zone 1 sur la Figure 54) ont aussi été effectuées. Ces analyses révèlent que le voile observé est principalement composé de carbone. Aucune trace de carbone n'est détectable en dehors de cette zone sombre, comme observé auparavant lors des caractérisations à l'issue des tests d'endurance mécanique.

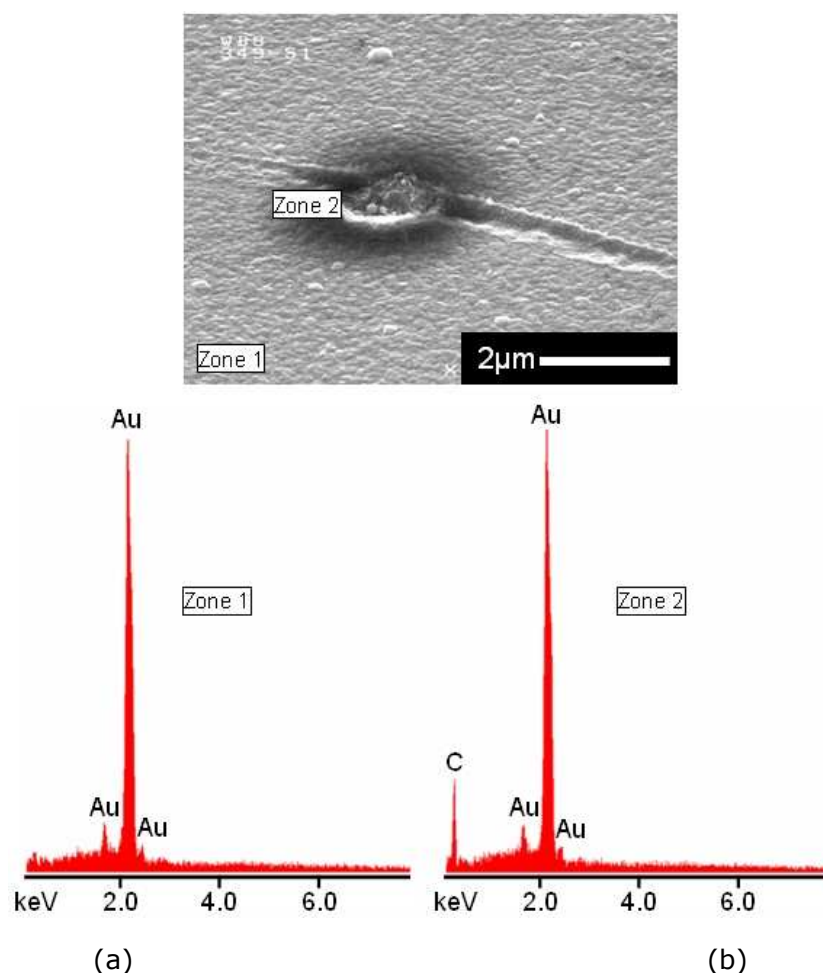


Figure 54. Mise en évidence de l'apparition de contamination carbonée durant le cyclage. Spectres EDX réalisés sur un contact doré à l'issue d'un million de commutations sous 5V/1mA.

(a) En dehors de la zone de contact et (b) sur la zone de contact.

Des cartographies de la zone de contact ont été réalisées grâce à un microscope à force atomique (AFM) équipé d'une pointe conductrice (SSRM) et il s'avère que la zone carbonée observée est isolante (cf. Figure 55). Neufeld et al. ont observé l'apparition

d'une couche de contamination de nature similaire lors de tests d'endurance réalisés sur des relais classiques opérant en dehors des conditions d'arc [Neufeld1995]. Cette contamination carbonée provient d'après eux de la pyrolyse des vapeurs organiques émanant des parties plastiques composant le packaging du relais. Cette pyrolyse se produirait lors de la commutation du courant, période au cours de laquelle des arcs électriques de courte durée et instables peuvent potentiellement se développer, même si le dispositif opère en dehors des conditions d'arc [Rieder2000].

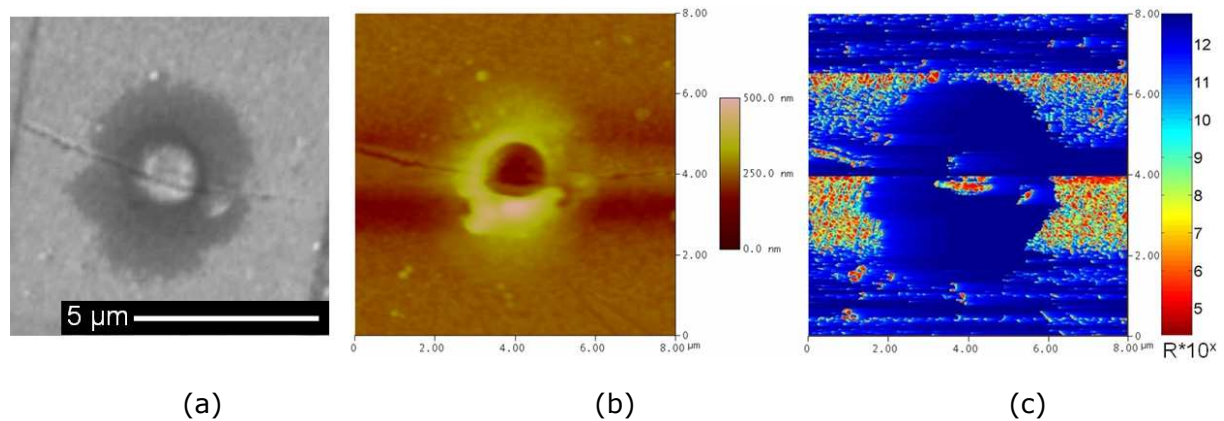


Figure 55. Caractérisation de la couche de contamination carbonée entourant un cratère. (a) Observation MEB. (b) Cartographie AFM et (c) cartographie SSRM¹⁰.

Les auteurs ont caractérisé électriquement cette contamination carbonée et une résistivité de $10^{-4} \Omega.m$ est mesurée, engendrant une augmentation de la résistance de contact de trois décades. Un tel scénario est similaire à celui que nous observons, la résistance de contact passant de quelques centaines de milliohms à quelques centaines d'ohms lorsque cette couche carbonée apparaît. De plus, Dickrell et al. ont mis en évidence le même mode de défaillance en étudiant un micro-contact opérant sous azote et à 3.3V/3mA [Dickrell2007]. La résistance de contact qu'ils mesurent, initialement de quelques centaines de milliohms, passe brusquement à quelques centaines d'ohms et des analyses en électrons Auger révèlent aussi l'apparition de carbone dans la zone de contact.

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que des espèces organiques étaient présentes sur nos surfaces de contact, que ce soit l'or ou le ruthénium. Leur décomposition lors des phases de commutation sous 5V/1mA engendrerait donc une couche de carbone sur la zone de contact, couche qui s'avère très peu conductrice. Leur décomposition peut avoir plusieurs origines. Un échauffement local assez important peut rompre les liaisons moléculaires des contaminants organiques et les transformer en résidus riches en carbone : il s'agit de la carbonisation. Un tel phénomène nécessite des températures de plusieurs centaines de degrés. De telles températures ne sont probablement atteignables que durant les phases d'ouverture du contact, phases où l'aire de contact se réduit fortement et donc où l'échauffement par effet Joule est important.

¹⁰ Une partie de la cartographie n'est pas résolue, la surface semble isolante au dessus et en dessous de l'auréole carbonée alors que ça ne devrait pas être le cas. Ceci est dû au fait que le contact électrique est difficile à prendre, en raison de la contamination des surfaces et de leur topographie. La pointe se contamine très rapidement lors du balayage et empêche une bonne prise de contact.

Un second mécanisme d'apparition de contamination carbonée existe et a été observé dès la fin des années 40 lors du développement des microscopes électroniques [Watson1947]. Il a ainsi été mis en évidence que le bombardement des surfaces par le faisceau électronique permet la décomposition des contaminants adsorbés, générant des spots de contamination très riches en carbone [Knox1976]. Pour se prémunir de cette contamination, de nombreuses améliorations en termes de propreté des chambres d'analyse ont été réalisées, permettant d'amener la microscopie au niveau que l'on connaît. Notamment, il a été observé que le fait de maintenir l'échantillon à une température de 200°C empêchait les contaminants organiques de s'adsorber sur les surfaces et supprimait ce problème de contamination carbonée [Ennos1954]. Dans certains cas l'apparition de contamination carbonée sous l'effet d'un bombardement électronique est évitée grâce à l'introduction de vapeur d'eau dans la chambre d'analyse [Toth2009]. Dans notre cas, nous verrons plus loin dans le manuscrit que les phases de fermeture et d'ouverture du contact sont propices à l'émission d'électrons par effet de champ, phénomène que nous détaillerons dans le chapitre 4. Un tel bombardement pourrait donc être à l'origine de l'apparition de la contamination carbonée que nous avons caractérisée.

L'augmentation de résistance que nous observons sur notre micro-interrupteur durant les tests d'endurance est donc engendrée par l'apparition de cette couche de contamination. Nous avons cependant vu que dans la majorité des cas un seul contact était endommagé. Le second contact devrait donc être capable de conduire le courant avec une résistance basse. Etudions alors plus en détail l'origine de la défaillance.

3.1.5. Apparition des défaillances

Dans la majorité des cas, les transferts de matière s'accompagnent de l'apparition de la couche de contamination carbonée que nous venons d'étudier. Nous avons utilisé le banc de test auquel nous avons déjà eu recours dans le chapitre 1, qui permet de déplacer un aimant à proximité du composant et de mesurer simultanément sa résistance (mesure 4 fils, courant fixé à 1mA). Nous pouvons ainsi comparer le cycle de commutation d'un composant neuf et celui d'un composant présentant de la topographie carbonée (cf. Figure 56). Nous remarquons que le composant endommagé présente des paliers de résistance (repérés (2) et (4) sur la Figure 56 ci-après).

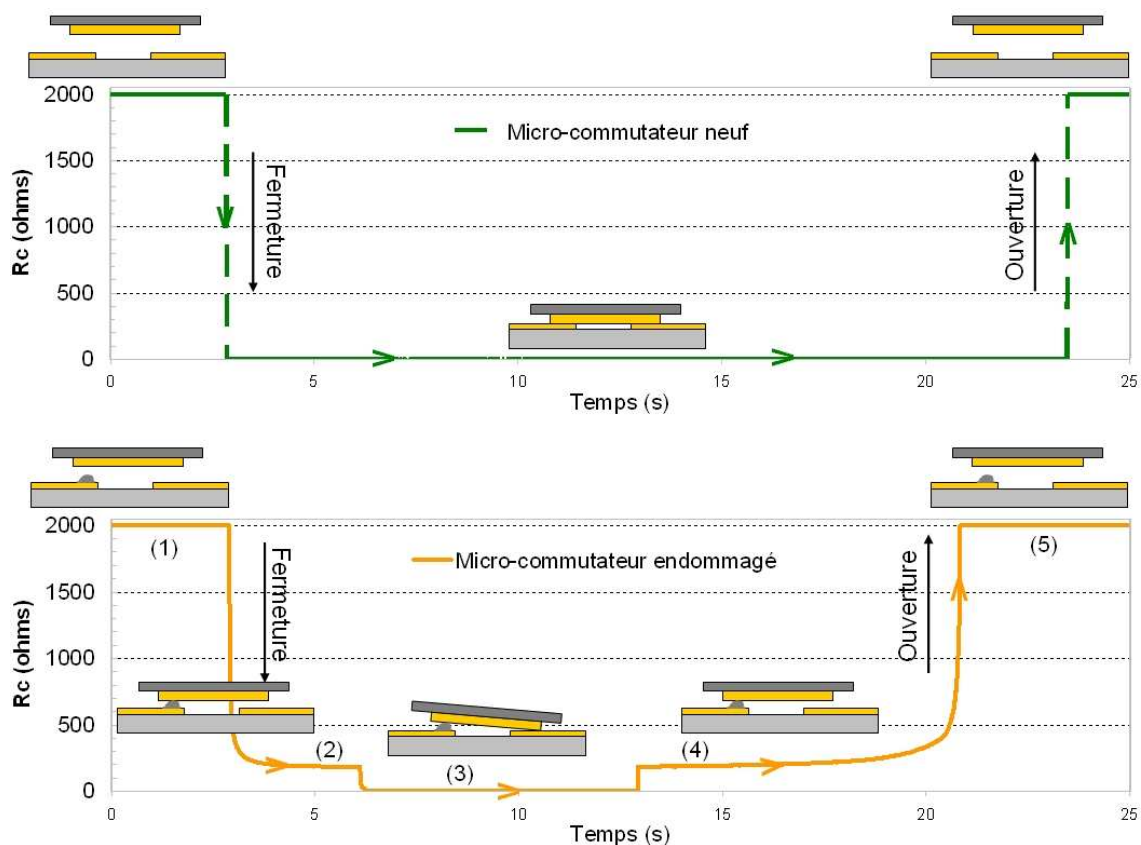


Figure 56. Comparaison d'un cycle de commutation pour un micro-interrupteur neuf et un micro-interrupteur endommagé.

Initialement les deux contacts du micro-interrupteur sont ouverts (phase 1). Lorsque le dispositif se ferme, le contact présentant le plus de topographie est le premier à se fermer. Si ce contact présente en plus de la contamination carbonée, la résistance de contact est alors de plusieurs centaines d'ohms (phase 2). A mesure que le mouvement de la membrane se poursuit, le second contact se ferme (phase 3) et la résistance de contact devient alors faible. Le micro-interrupteur est donc fonctionnel, sa résistance de contact à l'état fermé est basse¹¹. Lorsque le dispositif se rouvre, le contact fonctionnel est le premier à s'ouvrir et la résistance repasse alors à 200 - 300 Ω (phase 4) avant de se rouvrir totalement (phase 5).

Ce mode de commutation permet à certains composants de garder une résistance faible tout au long du cyclage, comme constaté sur les courbes d'endurance (figure 6). Il est donc important que le dispositif soit assez souple en torsion pour permettre aux deux contacts de se fermer correctement, même en présence d'un transfert de matière. Les premières versions du composant avaient une structure légèrement différente, avec des bras de torsion extérieurs à la membrane, rendant la structure très rigide latéralement. Avec une telle géométrie, aucun dispositif ne dépassait les 100000 cycles, le contact non carboné ne pouvant plus se fermer. De la même manière, des micro-interrupteurs à contact unique ont été conçus et testés dans des conditions absolument identiques, et leur durée de vie s'est avérée sans exception inférieure à 100000 cycles.

¹¹ Il faut noter toutefois que ce type de comportement peut amener le système à enregistrer une défaillance. En effet, la résistance est faible, certes, mais pas durant la totalité du cycle. Ainsi, si pendant l'intervalle de temps que dure l'acquisition de la résistance une partie des paliers est présente, la résistance enregistrée sera élevée. On parle dans ce cas de « fenêtre d'activation réduite ».

Si un *hillock* est présent sur la surface de contact, le micro-interrupteur est déséquilibré, beaucoup plus que dans le cas d'un transfert de matière anode-cathode. Dans ce cas-ci le second contact ne peut pas se fermer et le micro-interrupteur se ferme alors sur un seul contact : le contact endommagé, présentant un *hillock* carboné. A partir de ce moment, la résistance totale du micro-interrupteur est bloquée à plusieurs centaines d'ohms, comme observé sur les courbes d'endurance. La rupture de l'*hillock* sous l'effet du contact mécanique entre les deux contacts peut toutefois survenir et permettre de retrouver une résistance de contact basse. Ceci explique l'allure de certaines courbes d'endurance qui présentent des alternances de résistances basses et élevées.

3.1.6. Différence entre les deux polarités

Nous avons vu au début de ce paragraphe qu'une polarité (M+, contact mobile polarisé positivement) était plus favorable que l'autre. Deux différences ont été observées entre ces deux polarités, différences qui permettent d'expliquer ce comportement.

Premièrement, dans la polarité favorable, l'apparition d'*hillocks* est rare. Nous avons observé que, quelle que soit la polarité, les *hillocks* apparaissaient sur le contact fixe. Quasiment aucun monticule n'a été observé sur l'or de la membrane, que ce soit à l'issue des tests d'endurance ou des recuits de fin de fabrication. L'empilement technologique de la membrane, différent de celui des pistes, est donc peut-être moins contraint.

Si l'hypothèse d'une origine thermique est privilégiée par rapport à l'électromigration, il est donc nécessaire que le contact s'échauffe significativement pour que des *hillocks* apparaissent. Or lorsque la polarité est inversée, il est probable que la distribution de température soit différente, et n'engendre donc pas un échauffement suffisant du contact fixe. Un effet thermoélectrique, principalement lié à l'effet Thomson, pourrait aussi être à l'origine de cette dissymétrie dans la distribution de température [Holm1967]. Aucune expérience spécifique n'ayant été effectuée pour vérifier cette hypothèse, nous ne pouvons qu'en rester au stade des suppositions. Ceci pourrait expliquer pourquoi dans la polarité M+ aucun *hillock* ne croît sur les surfaces de contact.

Dans certains cas, une seconde différence a été observée dans la polarité M+ uniquement : l'absence de contamination carbonée à l'issue des tests d'endurance. Un des deux matériaux de contact est donc probablement moins contaminé initialement et le bombardement du contact par les électrons ne génère alors pas de contamination. Cette absence de contamination carbonée a malheureusement été observée sur un seul lot de fabrication. Ce n'est donc pas un comportement systématique, mais cela permet d'aborder le problème du nettoyage des surfaces de contact.

3.1.7. Nettoyage des surfaces de contact

Le packaging du composant est une étape sous-traitée à une entreprise extérieure, il se passe donc souvent plusieurs mois entre la fin de la fabrication et l'étape de packaging. Pendant ce temps les wafers sont stockés en environnement propre, mais il a été montré que le degré de contamination des surfaces d'or augmente linéairement avec le temps d'exposition à l'air, même dans un environnement de salle blanche [Ma2007]. Nous avons donc très peu de maîtrise de l'état de propreté des surfaces de contact à l'issue du packaging.

Nous avons cependant vu qu'une couche de contamination était présente sur nos surfaces de contact, avant cyclage. Nous avons alors procédé à des tests de nettoyage des contacts dorés sur des composants avant packaging. Le recuit de fin de fabrication sous azote a été remplacé par un recuit sous vide. Les résistances des micro-interrupteurs ainsi traités ont ensuite été mesurées sur un wafer complet sans packaging (~7000 composants). Leur bon fonctionnement a aussi été testé en procédant à un cycle de commutation sans courant. Le résultat de ces tests est présenté dans le Tableau 10 ci-après.

	Initialement	Après nettoyage
Résistance (Ω)	1.66	0.37
Min	0.98	0.24
Max	2.76	0.63
Pourcentage de composants fonctionnels	96 %	19 %

Tableau 10. Effet du nettoyage des surfaces d'or.

Une diminution nette de la résistance est observée, traduisant un nettoyage efficace des surfaces d'or. Cependant ce résultat est à pondérer par le fait que la majorité des micro-interrupteurs nettoyés ne se rouvre pas lors des tests de commutation. Les contacts sont donc définitivement collés : initialement 96% des composants commutent correctement, contre seulement 19% à l'issue du nettoyage ! L'observation au MEB des contacts à l'issue de ces tests est présentée en Figure 57 et met en évidence d'importantes zones d'adhésion. Un tel phénomène n'est pas surprenant, l'or étant connu pour son adhésion importante (propre, mou et ductile) [Holm1967, Angus1968].



Figure 57. Observation MEB de contacts dorés ayant subi un collage permanent à l'issue du procédé de nettoyage des surfaces.

La conclusion de ce paragraphe est qu'un nettoyage des surfaces d'or serait indispensable pour éviter l'apparition d'une couche de contamination carbonée lors des tests d'endurance avec interruption de courant. Cependant un nettoyage efficace sur l'or engendre un collage permanent des contacts, avec impossibilité de rouvrir le micro-interrupteur. Une telle conclusion est défavorable à l'utilisation de l'or en tant que matériau de contact pour micro-interrupteurs. Les mêmes tests de nettoyage ont été effectués sur le ruthénium et aucun collage permanent n'a été observé, ce qui est un point positif pour le ruthénium, matériau que nous allons maintenant étudier dans les mêmes conditions que l'or.

3.2. Contacts en ruthénium

Plusieurs séries de micro-interrupteurs dotés de contacts recouverts de ruthénium ont été testés. Rappelons que le ruthénium est intégré sous forme d'une couche de 100 nm d'épaisseur, déposée sur la couche d'or utilisée pour réaliser les contacts dorés. Comme pour les contacts dorés, plusieurs comportements peuvent être identifiés durant les tests d'endurance. La Figure 58 ci-dessous présente des évolutions typiques de résistances en fonction du nombre de cycles effectués.

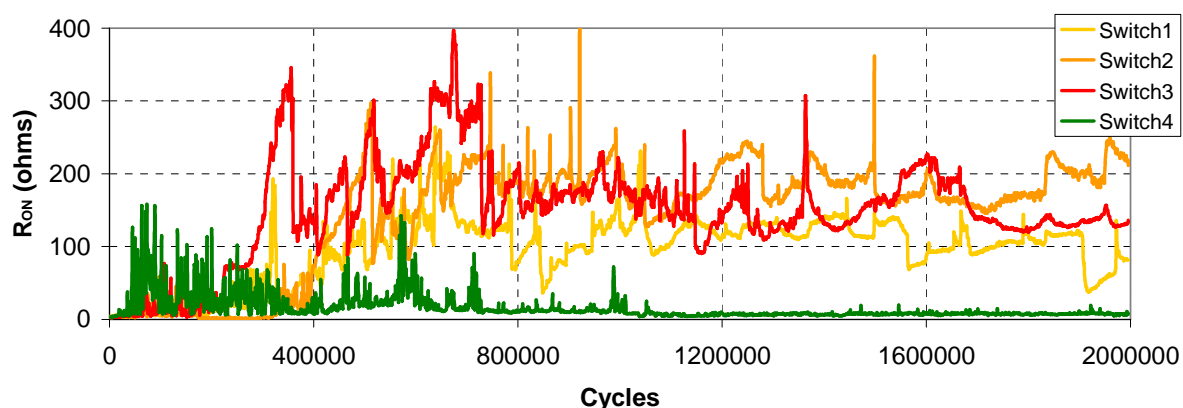
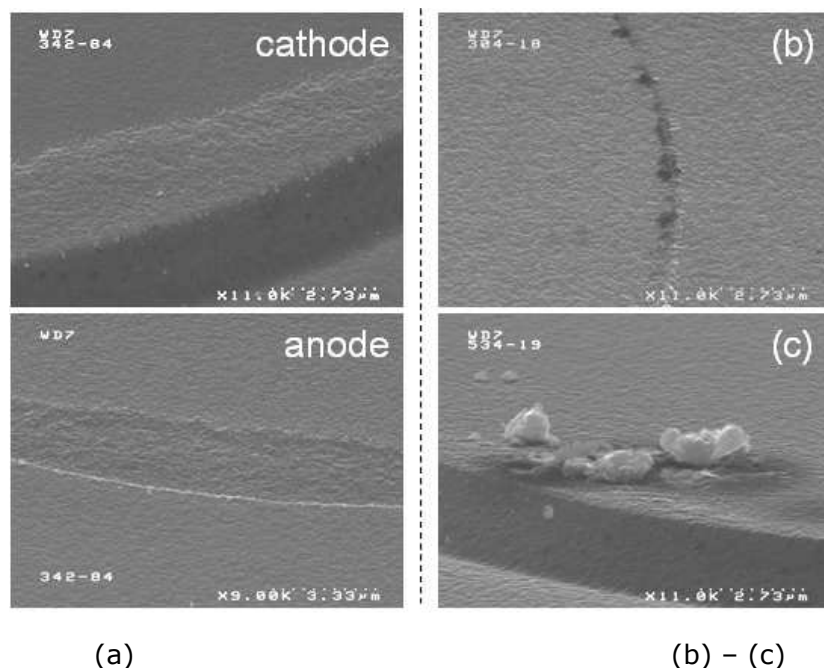


Figure 58. Evolution de la résistance des micro-interrupteurs aux contacts recouverts de ruthénium en fonction du nombre de commutations sous 5V/1mA.

La grande majorité des dispositifs réalise plus d'un million de cycles en conservant une résistance inférieure à 500 Ω . Cependant très peu conservent une résistance relativement basse tout au long du cyclage (composant 4), la majorité des composants voit sa résistance augmenter à plusieurs centaines d'ohms à l'issue de quelques centaines de milliers de cycles (composants 1 - 3). Les tests ont été effectués dans les deux polarités possibles, comme précédemment et dans ce cas une polarité est légèrement plus favorable mais la différence n'est pas aussi nette que pour les contacts dorés.



(a) (b) – (c)

Figure 59. Observation MEB des contacts recouverts de ruthénium à l'issue des tests d'endurance.
(a) Transfert de matière anode-cathode. (b) Apparition de polymères de friction.
(c) Apparition de particules détachées de la surface.

L'observation MEB des zones de contact à l'issue des tests met en évidence trois types de dégradations différentes (cf. Figure 59 ci-dessus) :

- (a) Des transferts de matière dirigés de l'anode vers la cathode, comme sur les contacts dorés, avec ou sans présence de carbone.
- (b) L'apparition d'une couche de contamination carbonée sur le pourtour de la zone de contact.
- (c) Des particules détachées de la surface, accompagnées de contamination carbonée.

Les transferts de matière anode-cathode observés semblent du même type que sur les contacts en or et feront l'objet du chapitre 4 de ce manuscrit. Nous pouvons toutefois noter que la quantité de matière transférée est moindre que sur l'or. La contamination carbonée apparaissant sur le pourtour du contact est probablement de la même nature que celle observée lors des tests d'endurance mécanique : il s'agit de polymères de friction. Des cartographies à l'AFM à pointe conductrice ont alors été effectuées sur la zone de contact et le résultat est présenté en Figure 60.

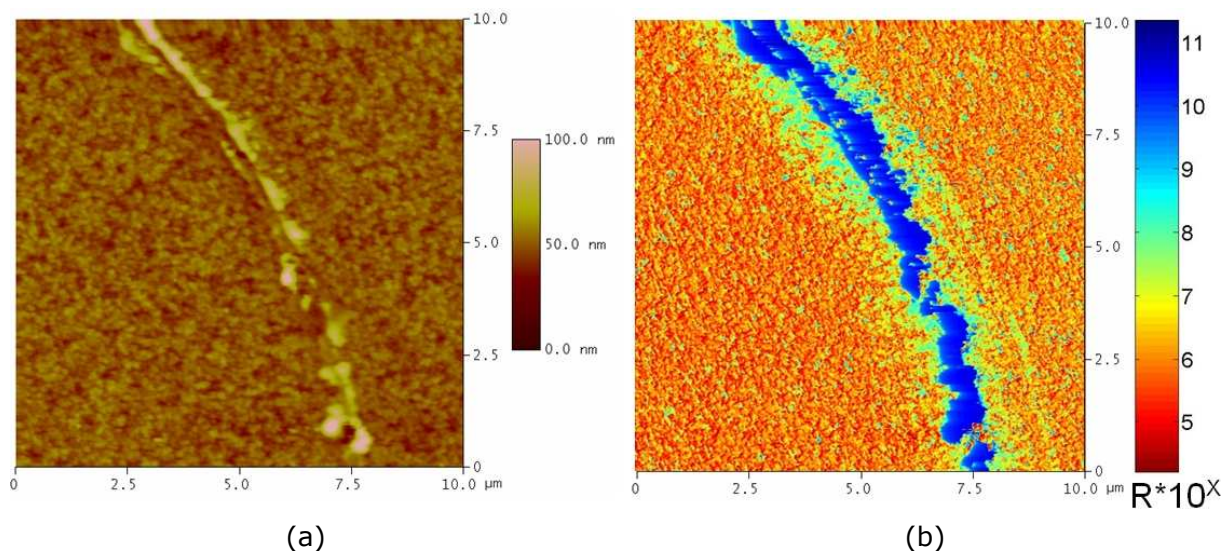


Figure 60. Cartographie des polymères de friction apparus à l'issue de tests d'endurance sur des contacts recouverts de ruthénium. (a) AFM et (b) SSRM

La cartographie AFM nous apprend que la couche de polymères de friction mesure environ 35nm d'épaisseur environ, valeur similaire à des mesures effectuées sur des contacts macroscopiques : 30nm [Shinichi1999]. La cartographie SSRM montre que cette couche de polymères de friction est fortement isolante et la différence de résistance entre la couche métallique et la couche de contamination est du même ordre de grandeur que dans le cas de la contamination observée précédemment (Figure 55). Une telle couche de contamination peut donc engendrer des résistances de contact de plusieurs centaines d'ohms, comme précédemment.

Le dernier type de défaut observé est l'apparition de particules détachées du contact. De telles particules avaient déjà été observées sur les contacts dorés, mais en quantité bien moindre. Il semblerait que ces particules soient liées à l'apparition des *hillocks* sur les surfaces de contacts. Or, nous avons montré qu'à l'inverse de l'or, aucun monticule ne se formait sur le ruthénium suite aux recuits. Les monticules que nous observons sur les contacts en ruthénium sont cependant tout le temps situés sur le pourtour de la zone de contact, zone où de l'érosion est systématiquement observée. L'érosion de la couche de ruthénium met donc probablement à nu le film d'or, film sur lequel, nous l'avons vu, apparaissent de nombreux *hillocks*. Une telle zone est alors très propice à la formation de monticules, d'autant plus que le film de ruthénium a empêché la relaxation des contraintes de l'or durant les recuits de packaging et de fin de fabrication.

La présence d'*hillocks* en grand nombre dans cette zone précise du contact est donc possible. Sous l'action mécanique de la membrane mobile entrant en contact avec les monticules, ils peuvent se briser ou s'arracher de la surface, engendrant les particules mobiles que nous observons. La Figure 61 ci-dessous présente plusieurs clichés MEB de ces *hillocks*, à peine sortis de la surface (a), détachés de la surface et déplacés à proximité (b et c) et un ensemble d'*hillocks* détachés de la surface (d).

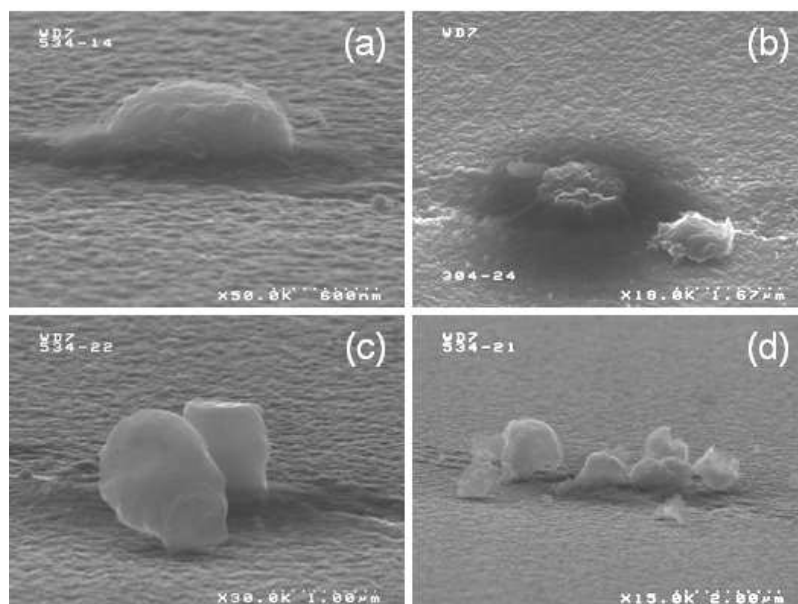


Figure 61. Observation MEB d'hillocks.

(a) Hillock isolé. (b) Hillock brisé. (c) Hillock solidaire de la surface et hillock brisé.
(d) Ensemble d'hillocks détachés de la surface.

L'apparition de ces monticules de matière s'accompagne chaque fois de contamination carbonée. La mode de défaillance du micro-interrupteur est alors le même que pour les contacts en or : la présence d'hillocks empêche le second contact de se fermer et le seul contact fermé est alors celui présentant des hillocks et du carbone. De plus, la présence de polymères de friction sur le second contact peut engendrer une résistance élevée, même si les deux contacts sont correctement fermés. Ceci pourrait expliquer la forte probabilité qu'ont les micro-interrupteurs à contact en ruthénium d'avoir une résistance de contact de plusieurs centaines d'ohms durant le cyclage.

4. Tests d'endurance sous 3V / 10 μ A

Pour remplir le cahier des charges, les micro-interrupteurs doivent être capables de réaliser 100 millions de cycles en commutant une charge résistive de 3V/10 μ A, tout en conservant une résistance inférieure à 10 k Ω . Plusieurs séries de 12 composants sont alors testées, avec des contacts dorés ou des contacts recouverts de ruthénium. Ces tests d'endurance sont effectués sur le banc de test n°2, avec une fréquence de 1000 Hz. A chaque cycle nous nous assurons que le composant commute et qu'il conserve une résistance inférieure au critère fixé (en s'assurant simplement que la tension aux bornes du composant passe en dessous de 1V durant le cycle). Les courbes d'endurance ne sont pas enregistrées mais les données recueillies à l'issue de ces tests sont indiquées dans le Tableau 11 ci-dessous.

	Contacts en or	Contacts en ruthénium
R initiale	1.5 Ω [1.3 – 2.1]	1.9 Ω [1.6 – 2.5]
R après 10⁸ cycles	52 Ω [0.9 – 350]	123 Ω [10.4 – 800]
R \leq 2 Ω	70 %	0 %
R \sim 20 Ω	0 %	70 %
R \sim 200 Ω	4 %	30 %
Collage permanent	16 %	0 %

Tableau 11. Résultats des tests d'endurance sous 3V/10 μ A.

A l'issue des tests d'endurance, la totalité des micro-interrupteurs possédant des contacts en ruthénium est opérationnelle. Leur résistance a augmenté sans exception mais reste inférieure au critère de défaillance fixé et aucun collage permanent des contacts n'est enregistré. A l'inverse, les composants avec des contacts en or conservent en majorité une résistance basse, mais 16% d'entre eux subissent un collage permanent des contacts. L'or, à l'inverse du ruthénium, ne remplit donc pas le cahier des charges à ce calibre de test. L'observation MEB des zones de contact à l'issue de ces tests est présentée sur les Figure 62 et 63.

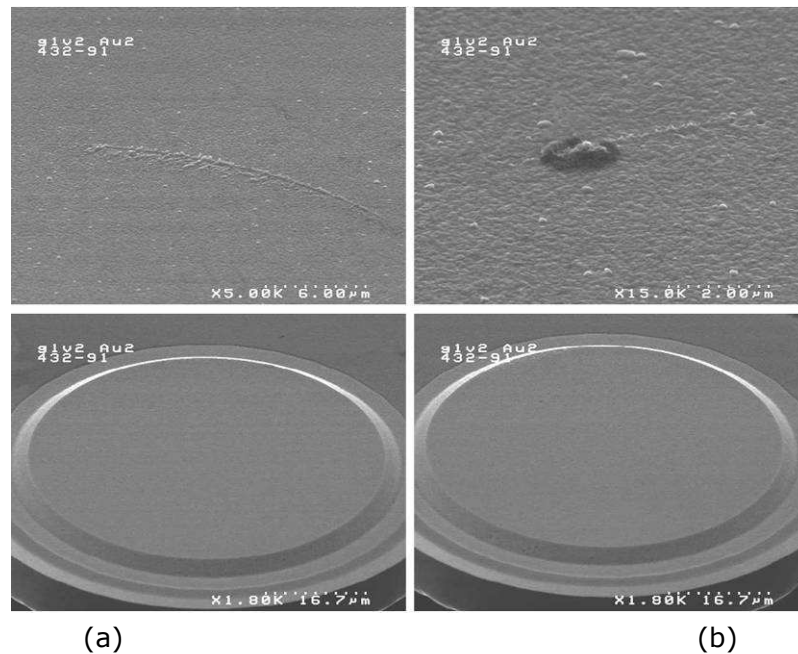


Figure 62. Observation MEB des contacts dorés à l'issue de 100 millions de commutations sous 3V/10 μ A. (Haut : contacts fixes. Bas : contacts mobiles).
(a) Contact droit et (b) Contact gauche.

Les micro-interrupteurs à contact dorés présentent, quelle que soit la polarité de test :

- (a) Un contact légèrement érodé, soit présentant un transfert de matière anode-cathode, soit une dégradation du même type que celle observée lors des tests d'endurance mécanique.
- (b) Un contact avec l'apparition d'un petit *hillock*, toujours sur le contact fixe, accompagné de contamination carbonée.

La dégradation des contacts semble donc être un intermédiaire entre les dégradations observées lors des tests d'endurance mécanique et des tests sous 5V/1mA. L'écrouissage

observé peut engendrer des collages permanents de contacts, comme durant l'endurance mécanique. La présence d'un *hillock* carboné, s'il est trop volumineux, peut engendrer une résistance élevée en déséquilibrant mécaniquement les deux contacts, comme durant les tests sous 5V/1mA. Mais dans la majorité des cas ce monticule est de taille réduite, le second contact non contaminé peut donc se fermer, ce qui permet de conserver une résistance basse, inférieure à 2 Ω dans 70 % des cas.

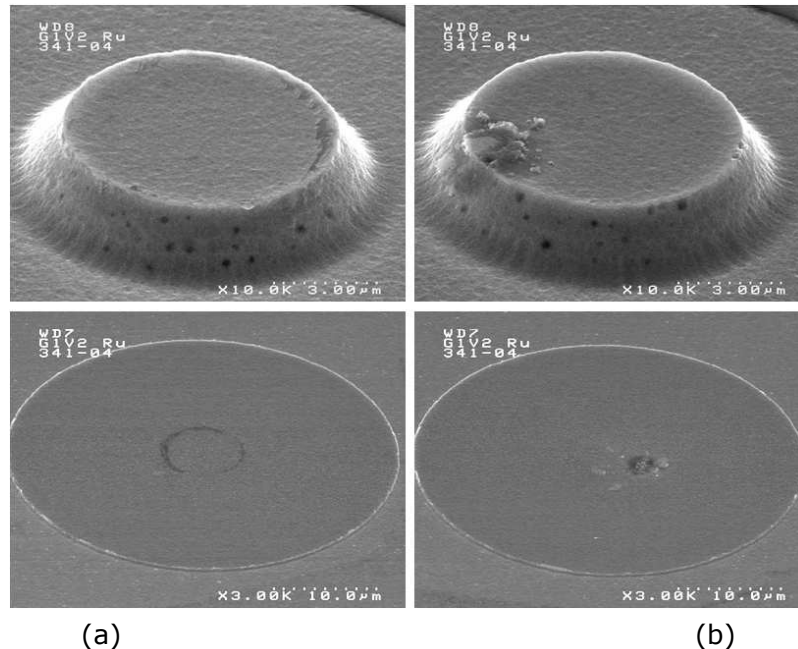


Figure 63. Observation MEB des contacts en ruthénium à l'issue de 100 millions de commutations sous 3V/10 μ A. (Haut : contacts mobiles. Bas : contacts fixes).
(a) Contact droit et (b) Contact gauche.

Les micro-interrupteurs aux contacts recouverts de ruthénium présentent un contact aux dégradations similaires : un petit *hillock* accompagné de carbone. Le second contact, quant à lui, laisse apparaître des traces de polymères de friction. Les deux contacts sont donc contaminés, ce qui explique que dans 100 % des cas la résistance augmente au cours du cyclage (cf. Figure 63).

Il faut noter que ces tests d'endurance sont effectués avec une fréquence de 1000 Hz. Donc si nous considérons qu'à chaque cycle le contact reste en position fermée la moitié du temps total du cycle, en 10⁸ cycles le contact reste fermé 5*10⁴ secondes. L'apparition des *hillocks* est un processus thermiquement activé, donc dépendant du bilan énergétique du contact. Dans ces conditions de test, le contact supporte un courant de 10 μ A, donc 100 fois plus faible que lors des tests sous 5V/1mA et donc une puissance dissipée par effet Joule 100000 fois plus faible. Les tests d'endurance à 5V/1mA sont effectués avec une fréquence de 2 Hz, donc à l'issue d'un million de cycles, le contact est resté en position fermée 25*10⁴ secondes. Nous remarquons alors que le bilan énergétique du contact lors de tests sous 5V/1mA est 50000 fois plus élevé que lors des tests sous 3V/10 μ A. La défaillance principale dans ces deux types de tests étant liée à l'apparition des *hillocks*, les différences radicales de durée de vie entre ces deux calibres sont donc compréhensibles. Il est donc important de tester les composants dans les

mêmes conditions que lorsqu'ils seront intégrés dans un produit fonctionnel, la fréquence de fonctionnement pouvant avoir un effet sur la durée de vie du produit.

5. Tests d'endurance sous 14V /10mA

Le calibre 14V/10mA est un calibre exploratoire, destiné au marché automobile, et nous allons voir qu'effectivement il est difficile d'assurer une fiabilité acceptable à cette tension élevée. Dans de telles conditions de courant et de tension, aucun arc électrique stable, qui serait extrêmement dommageable à nos contacts micrométriques, ne peut se développer. Les conditions minimales de courant et de tension pour qu'un arc électrique apparaisse sont 12,5V / 350mA pour l'or. Pour le ruthénium, matériau très peu utilisé dans les contacts macroscopiques, aucune donnée n'est disponible. Cependant les valeurs de courant minimal constatées pour les matériaux classiquement utilisés dans le contact électrique ne sont jamais inférieures à 350 mA. Seul le carbone présente un courant minimal d'arc de 10 mA, mais une tension de 20 V est alors nécessaire au développement d'un arc.

Les tests d'endurance menés à 14V/10mA sont donc en dessous des conditions d'arc électrique. Nous allons cependant voir que les dégradations observées durant ces tests sont importantes, et sans les travaux effectués par la suite, la présence d'un arc électrique pourrait être suspectée. Plusieurs séries de micro-interrupteurs ont été testées, dans les deux polarités possibles. Les tests n'ont jamais été poussés plus loin que 300,000 cycles (à part quelques exceptions), les composants ayant une durée de vie moyenne inférieure (cf. Tableau 12 ci-dessous).

	Contacts en or	Contacts en ruthénium
Nombre de cycles moyen	90,000	115,000
Polarité Membrane -	36,000	45,000
Polarité Membrane +	140,000	190,000
Mode de défaillance	Collage des contacts	Collage des contacts

Tableau 12. Résultats des tests d'endurance sous 14V/10mA.

Les micro-interrupteurs à contacts dorés ont été moins testés que ceux à contacts en ruthénium car des collages des contacts sont souvent enregistrés dès les premiers cycles. Le ruthénium semble limiter ces collages, comme nous l'avons déjà montré. Cependant pour les composants testés, la présence de la couche de ruthénium n'augmente pas la durée de vie de façon considérable. Nous allons en effet voir que le seul mode de dégradation observé sur les contacts est une érosion du matériau de l'anode, et donc 100 nm de ruthénium ne sont pas suffisants pour observer une différence radicale. Des contacts entièrement en ruthénium seraient intéressants à tester. L'observation MEB des zones de contact à l'issue de ces tests d'endurance est présentée sur la Figure 64.

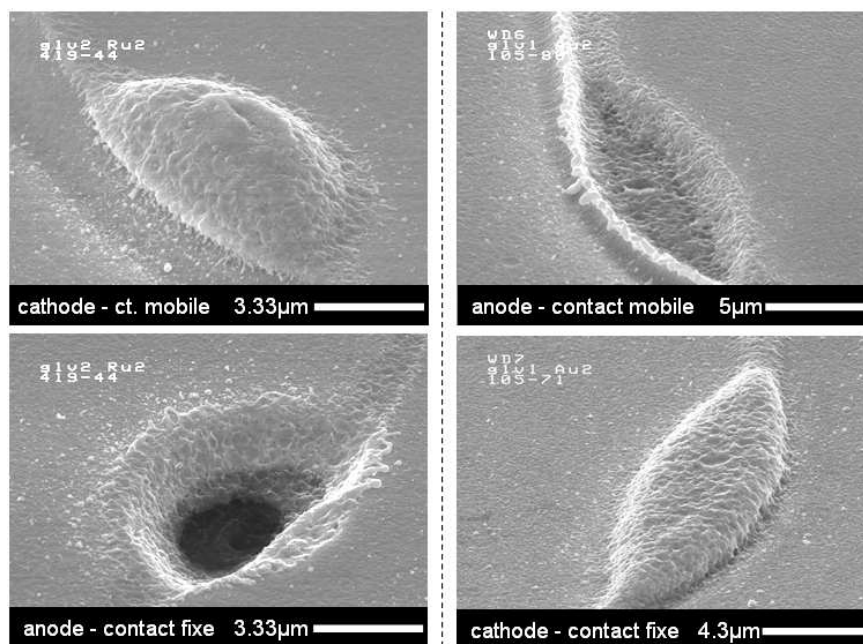


Figure 64. Observation MEB des contacts à l'issue des tests d'endurance sous 14V/10mA.

Dans tous les cas, quel que soit le matériau, la dégradation des contacts est identique : un transfert de matière s'opère depuis l'anode vers la cathode. Dans le cas où la cathode est la membrane, le matériau du contact fixe est érodé ainsi que les sous-couches de chrome et de nickel ; le nitrure de silicium présent en dessous est révélé. Des analyses EDX le confirment. Dans l'autre polarité le matériau de la membrane est érodé, certaines fois jusqu'au FeNi composant la membrane.

Nous remarquons cependant dans le Tableau 12 qu'une polarité est largement plus favorable que l'autre. Si la membrane mobile joue le rôle d'anode, la durée de vie est augmentée. Nous pouvons penser que cela est dû à l'épaisseur de matériau plus importante du côté de la membrane (3 µm du côté membrane contre 1 µm sur le contact fixe). L'érosion de la totalité du matériau de contact du contact mobile nécessiterait donc plus de cycles. Douze micro-interrupteurs ont alors été cyclés dans les deux polarités et un composant de chaque polarité a été prélevé régulièrement et analysé. Le résultat de ces analyses MEB est présenté sur la Figure 65 ci-après.

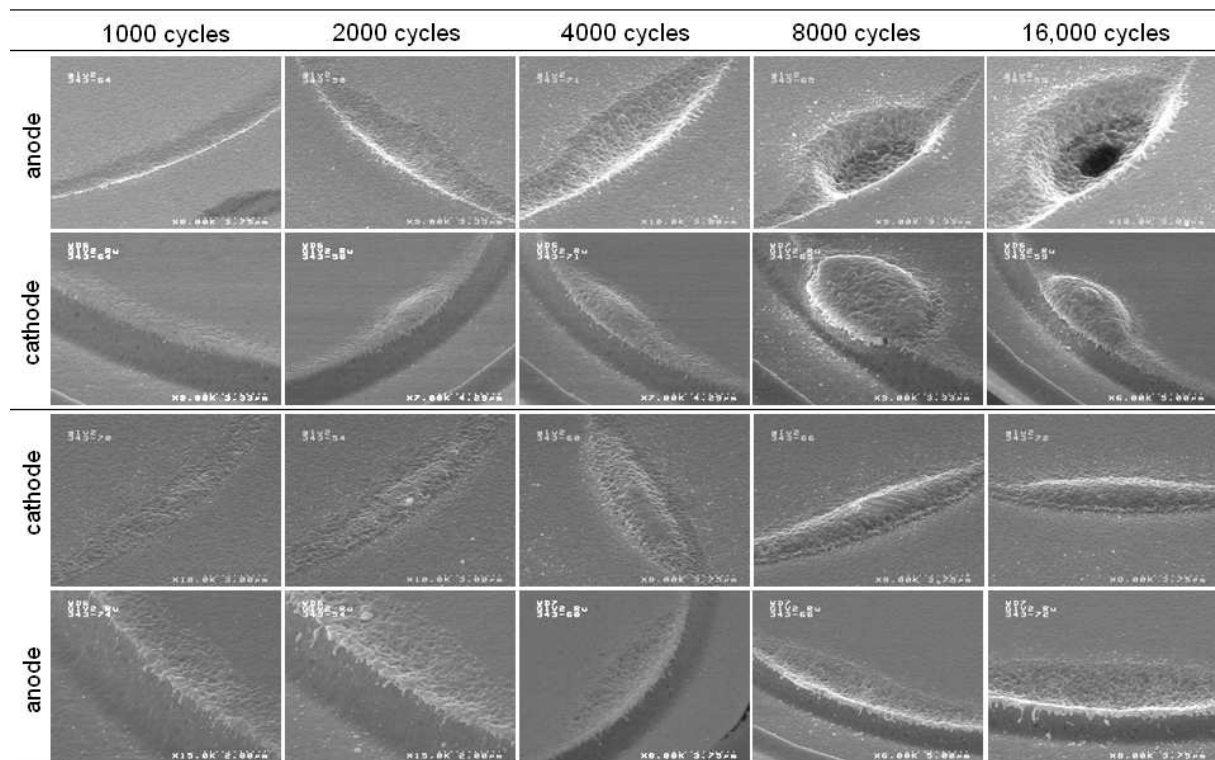


Figure 65. Observation MEB des contacts de composants prélevés durant les tests d'endurance sous 14V/10mA.

Nous remarquons que l'érosion se fait progressivement, la taille du cratère augmentant à mesure que le composant est cyclé et le volume du monticule sur la cathode augmentant en conséquence. Un transfert de matériau de l'anode vers la cathode est donc très bien illustré par ces observations. Des projections de matière en fusion sous forme de gouttelettes est visible (cf. Figure 64), laissant penser que de l'échauffement local a eu lieu. Cependant le plus intéressant est de constater que dans la polarité la plus favorable lors des tests d'endurance (cathode fixe), l'érosion est moins rapide. L'épaisseur des matériaux n'est donc pas le paramètre principal justifiant l'endurance accrue observée dans cette polarité. Pour l'instant nous n'avons pas les données suffisantes pour expliquer un tel phénomène. Des investigations sur un véhicule de test simplifié (chapitre 4) nous permettront de proposer une explication et nous verrons que la présence de reliefs sur la cathode (l'arête du plot de contact) est à éviter si nous voulons limiter l'érosion des contacts.

A ce calibre de test, aucune trace de contamination carbonée (ou très peu) n'a été relevée, que ce soit pour les contacts dorés ou recouverts de ruthénium. La contamination observée précédemment se forme probablement aussi à 14V, mais il a été montré qu'une tension de 2 à 6 V pouvait permettre de sublimer cette couche de contamination [Neufeld1995]. Sous 14V, la couche de contamination qui se forme à chaque cycle est donc probablement détruite au fur et à mesure.

6. Tests d'endurance en température

Le cahier des charges impose un fonctionnement du micro-interrupteur de -40°C à +85°C. Deux séries de 12 composants pourvus de contacts recouverts de ruthénium ont ainsi été testés sous 5V/1mA dans ces conditions et les résultats des tests d'endurance

obtenus fournissent des résultats très intéressants, en particulier à basse température. La Figure 66 ci-dessous présente alors l'évolution de la résistance des composants, testés à température ambiante et à -40°C.

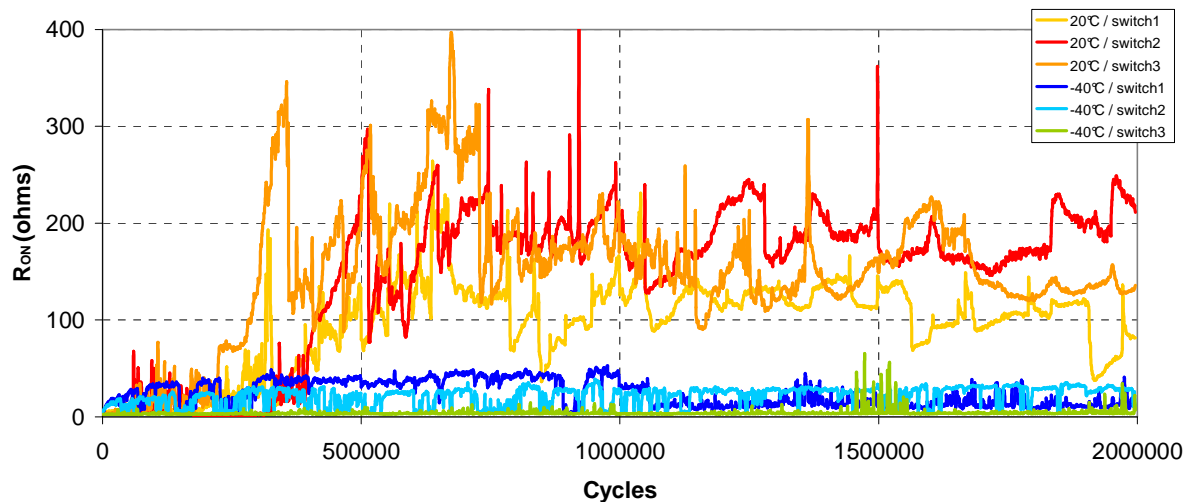


Figure 66. Evolution de la résistance en fonction du nombre de commutations effectuées sous 5V/1mA (contact Ru-Ru). Comparaison entre cyclages à température ambiante et à -40°C.

Comme constaté précédemment, à température ambiante la majorité des dispositifs subit une augmentation de résistance pour atteindre un niveau de 100 – 300 Ω . Par contre, à -40°C la totalité des composants conserve une résistance faible, souvent de l'ordre de l'ohm et en règle générale toujours inférieure à 50 Ω . Le comportement est donc radicalement différent, et l'observation des zones de contact confirme cette constatation (cf. Figure 67).

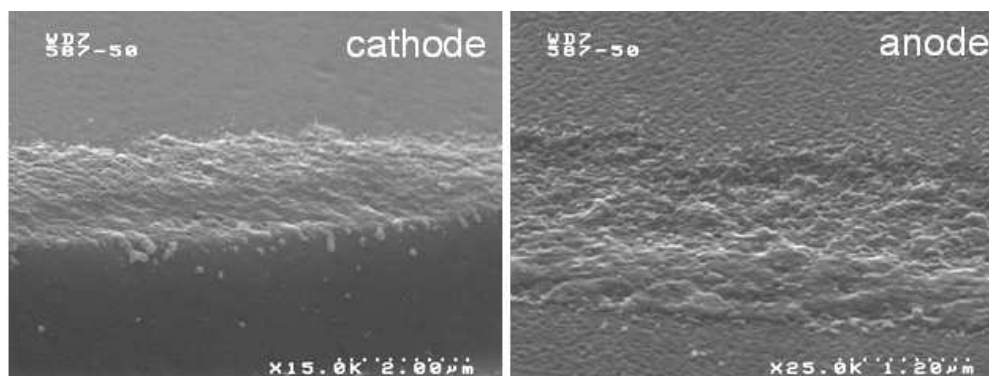


Figure 67. Observation MEB de contacts recouverts de ruthénium à l'issue des tests d'endurance sous 5V/1mA à -40°C.

L'analyse des contacts à l'issue des tests d'endurance -40°C révèle qu'aucun *hillock* n'est visible, alors qu'ils sont présents en grand nombre lorsque les tests sont effectués à température ambiante. De légers transferts de matière anode-cathode sont observés systématiquement, ainsi que de très légères traces de polymères de friction. Les contacts sont donc quasiment intacts à l'issue des tests, ce qui explique la résistance basse

constatée à cette température. La formation d'*hillocks* et l'apparition de contamination carbonée semblent donc inhibées à basse température.

Ceci ne nous permet cependant pas de conclure sur l'origine des *hillocks*. Un échauffement local entre en jeu, c'est maintenant certain suite à ces tests. Mais l'électromigration est aussi un phénomène qui s'intensifie avec la température. Nous ne pouvons donc toujours pas attribuer clairement l'apparition des *hillocks* à un échauffement local ou à de l'électromigration. L'apparition de polymères de friction est largement réduite aussi, mais pas complètement. Une série de tests a aussi été effectuée à +85°C et l'évolution des résistances de contacts à l'issue de 500,000 cycles en fonction de la température de cyclage est présente sur la Figure 68.

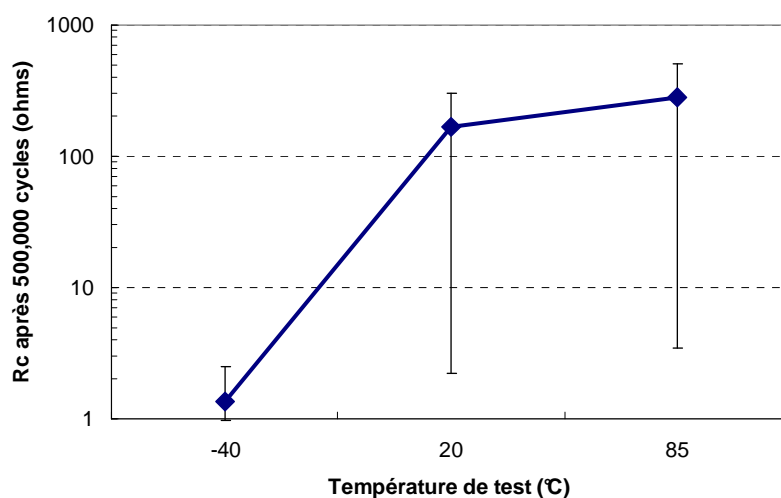


Figure 68. Valeurs moyennes (12 composants pour chaque température) des résistances en fonction de la température de cyclage (5V/1mA, contacts Ru-Ru).

Il est difficile de quantifier au MEB la quantité d'*hillocks* ou de polymères de friction présents sur les contacts à l'issue des tests. Ainsi à l'issue des tests à +85°C, des monticules, des polymères de friction et du carbone sont présents sur les surfaces, comme à température ambiante. Il semble cependant clair, au vu de la Figure 68, que la température favorise la dégradation du contact, en favorisant l'apparition soit des *hillocks*, soit de la contamination carbonée.

7. Bilan des modes de défaillance observés

Les modes de défaillance que nous avons mis en évidence sont directement liés au matériau de contact utilisé et au calibre auquel est testé le dispositif. L'étude de fiabilité du contact électrique qui vient d'être menée sur le micro-interrupteur Schneider/Leti est résumée dans le Tableau 13 ci-après.

Mode de défaillance	Phénomène physique	Matériau de contact	Calibre de test associé
Collage des contacts	Ecrouissage	Au	Mécanique 3V/10μA
	Transfert de matière anode-cathode	Au Ru	5V/1mA ¹² 14V/10mA
Augmentation de la résistance 100 – 300 Ω	Polymères de friction	Ru	Mécanique 3V/10μA 5V/1mA
	Croissance d' <i>Hillocks</i>	Au Ru	3V/10μA 5V/1mA
	Contamination carbonée	Au Ru	3V/10μA 5V/1mA

Tableau 13. Récapitulatif des modes de défaillances mis en évidence sur le micro-interrupteur.

La dégradation du contact électrique est clairement une combinaison de nombreux mécanismes de défaillance. Chacun de ces mécanismes a déjà été plus ou moins bien décrit par le passé, nous l'avons vu tout au long de ce chapitre. La seule exception notable concerne les importants transferts de matière dirigés de l'anode vers la cathode que nous observons lors des tests à 14/10mA et à 5V/1mA (dans une moindre mesure). Une description des mécanismes de défaillance mis en évidence est présentée ci-dessous, en complément du tableau précédent.

(1) Ecrouissage des surfaces d'or. Le contact mécanique répété entre les deux contacts dorés engendre des déformations plastiques et des arrachements de matière lors de l'ouverture du contact. Cette dégradation des surfaces ne modifie pas la résistance de contact mais engendre des défaillances par collage permanent des contacts.

(2) Polymères de friction sur le ruthénium. Le choc répété des deux contacts, associé à l'activité catalytique importante du ruthénium, provoque la formation sur les surfaces de contact d'une contamination de type polymères. Un tel phénomène engendre une augmentation de la résistance de contact de deux à trois ordres de grandeur.

(3) Erosion des matériaux de contact. Ce phénomène, observé sur l'or et sur le ruthénium, consiste en un transfert de matière de l'anode vers la cathode, aboutissant à l'érosion du matériau de contact de l'anode au profit de la cathode. Ce mécanisme engendre des défaillances par collage définitif des deux contacts. Il s'accompagne certaines fois de l'apparition de contamination carbonée, engendrant des résistances de contacts élevées (deux à trois décades supplémentaires). Ce phénomène est l'objet du chapitre 4.

(4) Croissance d'*hillocks* sur les surfaces. Sous l'effet du passage du courant dans une zone réduite le matériau s'échauffe et des contraintes compressives se développent dans le plan du film, engendrant l'apparition de monticules de

¹² N'entraîne pas de collage des contacts à 5V/1mA dans notre cas, « grâce » à la présence de contamination carbonée.

matière. Ces monticules de matière déséquilibrent la structure du micro-interrupteur et empêchent le second contact de se fermer. De plus, ce phénomène s'accompagne de contamination carbonée qui a pour conséquence d'augmenter la résistance de contact de deux à trois décades.

(5) Apparition de contamination carbonée. De la contamination riche en carbone et fortement isolante apparaît sur les surfaces d'or et de ruthénium durant le cyclage. Cette contamination va toujours de pair avec un transfert de matière ou un *hillock*. Son apparition est liée à la décomposition des contaminants surfaciques, soit sous l'effet de la température locale élevée, soit sous l'effet du bombardement électronique.

8. Conclusions du chapitre

L'étude des mécanismes de défaillance du contact électrique permet de révéler les qualités et les défauts des deux matériaux de contact que nous avons testés. Nous remarquons qu'actuellement aucun de ces deux matériaux n'est idéal.

- (1) L'or présente un écrouissage important, une tenue à l'érosion réduite et une propension à former des *hillocks* sur les surfaces. L'apparition de ces *hillocks* s'accompagne de carbone isolant, phénomène qui pourrait être évité par un nettoyage approprié des surfaces. Mais malheureusement un tel nettoyage des surfaces d'or semble engendrer des collages permanents.
- (2) Le ruthénium engendre des polymères de friction mais semble posséder une meilleure tenue à l'érosion. De nombreux *hillocks* se forment sur sa surface mais la présence d'or en sous-couche ne permet pas de séparer les contributions de chaque matériau. Un nettoyage des surfaces permet d'améliorer la résistance de contact et n'entraîne aucun collage permanent.

Ces observations nous amènent à la conclusion que l'or n'est pas un matériau de contact approprié pour obtenir des contacts microscopiques fiables. Inversement, le ruthénium s'avère être un meilleur candidat, il ne présente pas le problème de collage des contacts, même après un nettoyage poussé des surfaces. L'efficacité d'un tel nettoyage vis-à-vis des polymères de friction n'a malheureusement pas pu être testée, le packaging ne pouvant pas être réalisé directement après. L'absence d'*hillocks* sur un revêtement de ruthénium seul – et non pas mis en œuvre en « sur-revêtement » de l'or - reste aussi à démontrer.

Si ces points peuvent être vérifiés, le ruthénium utilisé seul en matériau de contact est intéressant pour la réalisation de contacts microscopiques fiables à bas niveau (3V/10μA et 5V/1mA). Pour cela, une méthode de packaging hermétique, à scellement eutectique, réalisée dans le même équipement que la séquence de dégazage finale des surfaces est indispensable. Assurer la propreté du matériau de contact et surtout conserver cette propreté est indispensable au bon fonctionnement d'un micro-interrupteur.

La dureté du ruthénium est très supérieure à celle de l'or, d'un facteur presque 20. L'obtention d'un contact stable avec une couche unique de ruthénium nécessite donc une force plus élevée, comportement déjà étudié à maintes reprises dans la littérature sur des matériaux possédant une dureté semblable (cf. chapitre 1). La conception du micro-interrupteur doit donc être réalisée en conséquence, pour pouvoir développer une force

de contact suffisante et assurer une résistance de contact stable et reproductible ($>300\mu\text{N}$ [Schimkat1999]). Encore une fois le matériau de contact n'est pas le seul paramètre à ajuster, la conception du commutateur est aussi un paramètre important.

L'apparition des *hillocks* nous le prouve aussi : la croissance de ces monticules est liée à la présence de contraintes dans le film d'or. Un matériau moins contraint initialement peut donc résoudre le problème, associé à une sous-couche adaptée. Ces contraintes peuvent apparaître suite au procédé d'élaboration du matériau de contact, c'est pour cela que des procédés dits « *low stress* » ont été développés pour de nombreux matériaux. Encore une fois, le matériau de contact n'est pas le seul responsable d'une endurance réduite, son procédé d'élaboration exerce aussi une influence non négligeable (cela est d'autant plus vrai du point de vue de la contamination).

Trouver le matériau de contact idéal est donc une tâche ardue, mais elle n'est pas suffisante. Assurer un état de surface correct, conserver cet état de surface, concevoir un composant adapté à ce matériau, utiliser des procédés d'élaboration et des sous-couches compatibles avec ce matériau sont autant de tâches indispensables à l'obtention d'un micro-interrupteur fiable. Le dernier chapitre de ce manuscrit sera consacré à cette problématique.

Chapitre 3

Développement d'un banc dédié à évaluer l'endurance de nouveaux matériaux de contact

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les deux matériaux de contact testés ne permettent pas de garantir une durée de vie acceptable à tous les calibres de test imposés par le cahier des charges. L'or permet des durées de vie excellentes lors des cyclages mécaniques et sous 3V/10 μ A mais l'apparition de contamination carbonée lors des tests sous 5V/1mA augmente la résistance de contact au delà d'une valeur acceptable. Des tests de nettoyage des contacts ont été réalisés dans le but de s'affranchir de cette contamination et ils engendrent des collages permanents des contacts. Le ruthénium de son côté fournit des résultats décevants en endurance mécanique et sous 3V/10 μ A liés à une contamination importante des contacts engendrée par ses propriétés catalytiques. Il permet en revanche de limiter la formation d'*hillocks* et de transferts de matière, et un nettoyage des surfaces ne conduit pas à des collages permanents des contacts. Le ruthénium est donc potentiellement intéressant mais nécessite un nettoyage important ou l'ajout d'une étape de désactivation de sa surface.

A ce stade, il paraît donc essentiel de trouver un matériau de contact aussi performant que le ruthénium mais ne présentant pas les propriétés catalytiques de ce dernier. Evaluer l'endurance d'un matériau de contact susceptible de remplacer le ruthénium n'est cependant pas aisé. La fabrication complète du micro-interrupteur packagé requiert une centaine d'étapes, correspondant à un temps de fabrication de six mois. Toutes ces étapes de fabrication sont réalisées en salle blanche, dans des conditions extrêmement bien contrôlées et l'introduction d'un nouveau matériau dans un tel procédé est alors un travail fastidieux. A titre d'exemple, l'intégration du ruthénium dans le procédé actuel a nécessité six mois de développement et de nombreux lots de test. De plus, une cible de ruthénium adaptée à un dépôt en couche mince dans le procédé de fabrication actuel coûte une centaine de milliers d'euros.

Il est donc délicat d'intégrer directement un nouveau matériau de contact dans la filière de fabrication actuelle sans être sûr de la pertinence de ce choix. Le développement d'un banc de test permettant de s'assurer des performances accrues du remplaçant du ruthénium avant son intégration dans le micro-interrupteur est donc indispensable. Nous allons alors voir dans ce chapitre que cette approche a déjà été adoptée par d'autres groupes de recherche et nous étudierons les différentes solutions utilisées afin de développer notre banc de test. La conception du banc de test sera alors présentée, suivie de sa qualification. Enfin nous utiliserons le banc développé pour évaluer l'endurance d'un matériau de contact potentiellement intéressant : le tungstène.

1. Etat de l'art

L'étude de contacts microscopiques à l'aide de bancs de test est une approche qui n'est pas récente [Beale1992, Uenishi1992]. Reproduire des forces de contact aussi faibles que celles mises en jeu dans les microsystèmes n'est pas aisé, mais est indispensable pour réaliser des études pertinentes. L'application d'une force contrôlée requiert deux composants indispensables : un actionneur qui permet d'appliquer cette force et un capteur qui permet de la mesurer. Différentes approches ont ainsi été testées au cours du temps et sont présentées dans le Tableau 14.

Actionneur	Capteur	Références	Résolution	Type de test
Piézoélectrique	Jauge piézorésistive	Bromley2001	1 mN	Mesure de R _c
		Pruitt2004	< 1μN	
	Balance de précision	Uenishi1992	1 μN	Mesure de R _c
		Hannoe1996		Mesure de R _c
		Hyman1999		10 cycles
	Capteur de force (jauges de contraintes)	Schimkat1999	50 μN	Mesure de R _c
		Patton2005	1 μN ¹³	10 ⁵ cycles
		Yunus2008	500 μN	1000 cycles
Read2009		200 μN	Mesure de R _c	
Microscope à force atomique (actionneur piézoélectrique + capteur optoélectronique)		Beale1992	< 1μN	Mesure de R _c
		Tringe2003		Mesure de R _c
		Chen2007		10 ⁶ cycles (piézo)
		Yang2008		10 ⁴ cycles (piézo)
Nanoindenteur (actionneur et capteur de force électromagnétiques)		Jang2007	< 1μN	Quelques cycles
		Dickrell2007		100 cycles
		Gilbert2008		10 ⁵ cycles (piézo)
		NovaM2008		100 cycles

Tableau 14. Aperçu des bancs dédiés à l'étude de micro-contacts.

Une grande partie des études qui ont été menées sur les micro-contacts visait à étudier le comportement de la résistance de contact en fonction de la force, soit pour établir des modèles de résistance de contact adaptés aux échelles micrométriques, soit pour comparer le comportement de différents matériaux de contact. Dans ces cas-là, les contraintes sont les mêmes que les nôtres, il faut être capable d'appliquer une force de contact réduite de façon reproductible. Cependant notre problème diffère dans le sens où nous souhaitons tester l'endurance de nouveaux matériaux de contact. Le banc de test que nous allons développer doit donc être capable d'appliquer cette faible force de façon reproductible et rapide.

Deux approches principales existent : l'utilisation d'un nanoindenteur ou d'un microscope à force atomique (AFM). Par principe, ces deux appareils ont l'avantage de permettre un contrôle très précis de la force de contact appliquée. L'inconvénient est que leur fréquence de fonctionnement est faible : un nanoindenteur peut difficilement être actionné à plus de 0.05Hz [NovaM2008] et un AFM ne peut dépasser la trentaine de Hz¹⁴. Pour pallier ce problème, une astuce consiste à monter le contact fixe sur un actionneur piézoélectrique. Dans ces conditions, le nanoindenteur ou l'AFM est utilisé pour appliquer la force de contact précisément et l'actionneur piézoélectrique permet d'ouvrir et de fermer le contact. La Figure 69 illustre ce principe et nous remarquons en se rapportant au Tableau 14 que seuls les bancs de test exploitant ce système permettent de réaliser un grand nombre de cycles.

¹³ Capteur de force : Linear Variable Differential Transformer (LVDT), système identique à celui d'une balance de précision (capteur de déplacement inductif).

¹⁴ En réduisant le nombre de points d'acquisition il est possible de cycler jusqu'à 200Hz, mais dans ces conditions les données récoltées (résistance de contact, forces de contact et d'adhésion) sont très peu précises.

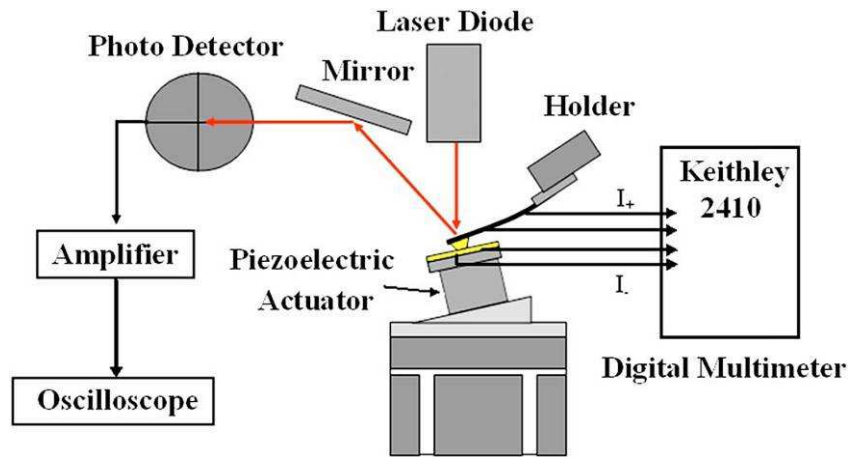


Figure 69. Principe du banc de cyclage développé par Chen et al. La partie notée « Holder » est en fait un AFM. [Chen2007]

Il est donc possible de développer des bancs de test adaptés à l'évaluation de l'endurance de nouveaux matériaux de contact. Cependant les options qui s'offrent à nous sont basées sur des appareils coûteux et complexes (AFM ou nanoindenteur : >100k€). De plus, ces appareils sont volumineux et sensibles, ce qui rend difficile leur mise sous atmosphère contrôlée. Or l'endurance de matériaux de contact n'est pas le seul paramètre que nous souhaitons évaluer. La nature de l'atmosphère environnant le contact peut avoir une influence non négligeable sur la durée de vie d'un micro-relais, les travaux menés sur les relais macroscopiques l'ont déjà montré [Johler2000]. Il importe donc de pouvoir disposer d'un banc de test compact et robuste, pouvant aisément loger dans une enceinte hermétique.

Enfin le dernier inconvénient des bancs de test publiés est qu'ils utilisent des véhicules de test nécessitant des étapes de fabrication en salle blanche. Ces véhicules de test sont généralement des leviers en silicium micro-fabriqués avec un plot de contact sur leur surface [Chen2007, Gilbert2008] ou des cantilevers prélevés sur des micro-relais [Yang2008], voire des dispositifs plus complexes intégrant des pistes de contact fixes et un plot de contact mobile suspendu par des cantilevers [Read2009, Jang2007]. Dans notre cas, nous souhaitons éviter d'avoir recours à des étapes de micro-fabrication, pour des raisons budgétaires et de rapidité.

Utiliser les principes des bancs de test présentés dans le Tableau 14 n'est donc pas adapté à notre besoin. Nous allons devoir imaginer une conception nouvelle ne présentant pas tous les inconvénients que nous venons d'énumérer, tout en reproduisant le plus fidèlement possible le fonctionnement d'un micro-relais. Nous avons alors choisi de développer un banc de test peu coûteux et compact, utilisant une actuation piézoélectrique et magnétique.

2. Cahier des charges

Le banc de test doit nous permettre de reproduire le plus fidèlement possible le fonctionnement de notre micro-interrupteur. Nous allons alors concevoir un micro-contact expérimental capable d'être actionné un grand nombre de fois, et ce de façon répétable. Nous devons, de plus, être capables de réaliser un grand nombre de cycles de

commutation en un temps réduit. Nous avons vu dans le chapitre précédent que la durée de vie de notre micro-interrupteur variait entre quelques centaines de milliers et quelques centaines de millions de cycles. Le banc doit donc être capable de réaliser des millions de cycles en un temps acceptable (quelques jours). Pour ce faire, sa fréquence de fonctionnement doit être d'au moins plusieurs dizaines de Hertz.

Le contact électrique dans un micro-interrupteur se différencie d'un contact électrique classique principalement par sa faible force de contact (100 - 500 μN), sa surface de contact réduite ($< 1\mu\text{m}^2$), la faible rugosité des surfaces de contact (quelques nm) et la faible épaisseur des matériaux de contact ($< 1\mu\text{m}$). Ces quatre paramètres caractérisent un micro-contact, et constituent les principaux critères de conception de notre micro-contact expérimental.

Les véhicules de test, qui vont constituer les deux parties du contact électrique expérimental doivent être des pièces standards, disponibles commercialement. Ils doivent de plus être facilement manipulables pour permettre le montage et le démontage du contact facilement. Les matériaux de contact à évaluer seront déposés (par pulvérisation ou évaporation) directement sur ces véhicules de test, ils doivent donc être de préférence conducteurs et adaptés à un dépôt de matériau.

Le contrôle de l'environnement de test est indispensable. De ce côté-là, nous disposons d'une enceinte hermétique de 28 cm de diamètre et de 30 cm de haut. Le banc de test doit donc pouvoir loger dans cet espace et pouvoir supporter un vide primaire (jusqu'à 10^{-3} mbar) et des gaz neutres (N_2 , Ar).

Le dernier critère, d'ordre économique, est de réaliser un dispositif beaucoup moins coûteux qu'un nanoindenteur ou un AFM.

3. Conception du banc de test

Pour rester dans des conditions aussi proches que possible du micro-interrupteur étudié, et pour s'appuyer sur les compétences développées au sein de l'équipe MEMS de Schneider Electric dans le domaine de l'actionnement magnétique, nous avons opté pour un système d'actionnement magnétique. Le point de départ de la conception du banc de test est alors l'interrupteur reed.

3.1. Véhicules de test

Un tel dispositif se compose de deux lamelles souples élaborées à partir d'un matériau ferromagnétique. Ces lamelles sont encapsulées dans une ampoule de verre, renfermant un gaz inerte ou un vide primaire (cf. Figure 70). L'application d'un champ magnétique extérieur (aimant ou bobine) permet de contacter les deux lames et ainsi établir le contact électrique, avec une force de l'ordre de plusieurs dizaines de millinewtons.

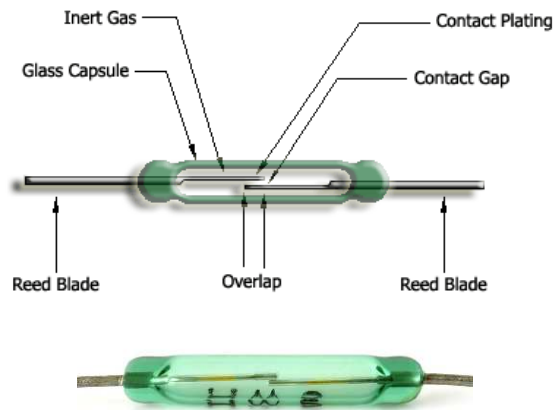


Figure 70. Ampoule reed, schéma de principe et photo.

Nous allons utiliser ces lamelles ferromagnétiques, que nous prélèverons directement sur des ampoules reed, pour réaliser le contact mobile de notre banc de test. Nous avons ainsi accès à des lamelles ferromagnétiques de taille contrôlée et aux propriétés mécaniques reproductibles. Cette approche nous permet alors d'utiliser un électroaimant pour réaliser l'actionnement du contact ; des fréquences de fonctionnement élevées sont donc aisément atteignables.

La partie fixe de notre micro-contact expérimental est une aiguille de test à embout sphérique, utilisée couramment dans les équipements de test électrique des circuits intégrés (*prober*). Ces aiguilles de test, lors de leur utilisation standard, servent à venir prendre un contact électrique sur les plots de connexion des circuits intégrés. Ces plots sont généralement de taille micrométrique, et le rayon de courbure de ces aiguilles est alors précisément contrôlé pour assurer un contact électrique optimal. De telles aiguilles sont disponibles commercialement avec des rayons de courbures contrôlés variant de 0.35 μm à 20 μm (cf. Figure 71).

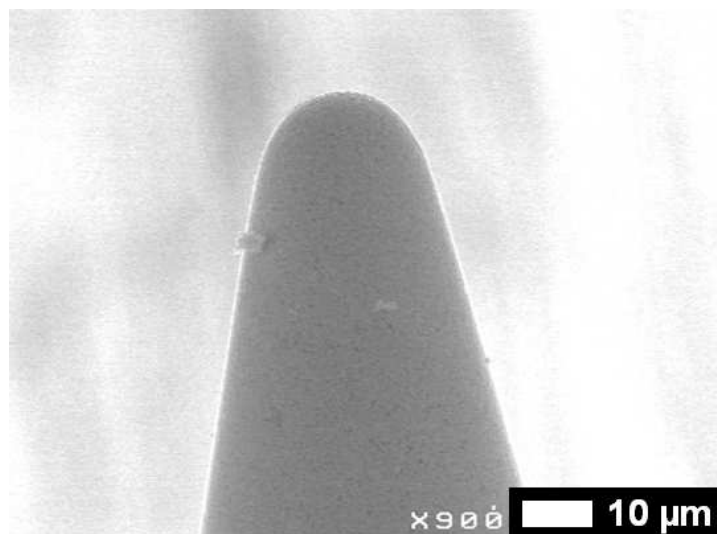


Figure 71. Image MEB d'une pointe de test électrique en tungstène possédant un rayon de courbure de 7 μm .

Si nous parvenons alors à mettre en contact une lamelle magnétique avec une telle pointe, la surface de contact résultante peut être calculée de la même façon que dans le chapitre 1, en supposant une déformation purement plastique. En appliquant 200 μ N sur un contact or-or ($H = 400$ MPa), le rayon du spot de contact résultant sera d'environ 250nm, tandis que pour un contact tungstène-tungstène ($H = 4$ GPa), il sera d'environ 150nm. L'ordre de grandeur est donc le même que dans un micro-relais. L'utilisation de ces deux véhicules de test pour composer la partie fixe (la pointe) et la partie mobile (la lamelle) de notre micro-contact expérimental est donc pertinente et reproduit une géométrie de contact de type sphère sur plan permettant d'obtenir des surfaces de contact reproductibles. Il s'agit maintenant de trouver un moyen d'actionner la lamelle tout en maintenant la force de contact à des valeurs représentatives des micro-relais.

3.2. Actionnement

Appliquer une force de contact de l'ordre de quelques centaines de micronewtons en utilisant des objets macroscopiques n'est pas aisé. Différentes approches ont alors été envisagées. Solliciter directement une lamelle reed en flexion s'est avéré inapplicable. Nous avons alors imaginé faire réaliser sur mesure des lamelles ferromagnétiques plus souples, mais les dimensions appropriées rendaient le système impossible à contrôler de façon répétable. Utiliser le principe de la balance de Roberval s'est avéré irréalisable à ces échelles, et nous avons alors finalement opté pour une configuration dans laquelle le contact est normalement fermé.

Dans le système que nous avons imaginé, le contact est initialement fermé, avec une force de contact bien contrôlée. L'ouverture du contact est alors réalisée en attirant la lamelle ferromagnétique à l'aide de l'électroaimant et la fermeture en relâchant simplement la lamelle. Le pilotage de la bobine à l'aide d'un signal périodique permet alors d'alterner ces séquences d'ouverture/fermeture et donc de réaliser un cyclage.

Le point fort de ce système réside dans le fait que la force de contact a besoin d'être réglée précisément uniquement lors de la mise en contact initiale. Ensuite, si aucune modification surfacique n'a lieu ou si aucune dérive ne se produit, cette force reste identique tout au long du cyclage. A chaque cycle la lamelle revient se poser sur la pointe avec la même force qu'au cycle précédent, indépendamment du signal envoyé dans la bobine. Toute la difficulté réside alors dans la mise en contact de ces deux véhicules de test avec la force voulue.

3.3. Application de la force de contact

Dans la configuration que nous avons choisie, la force de contact entre la lamelle et l'aiguille va être définie par le déplacement vertical que nous imposons à la lamelle (cf. Figure 72).

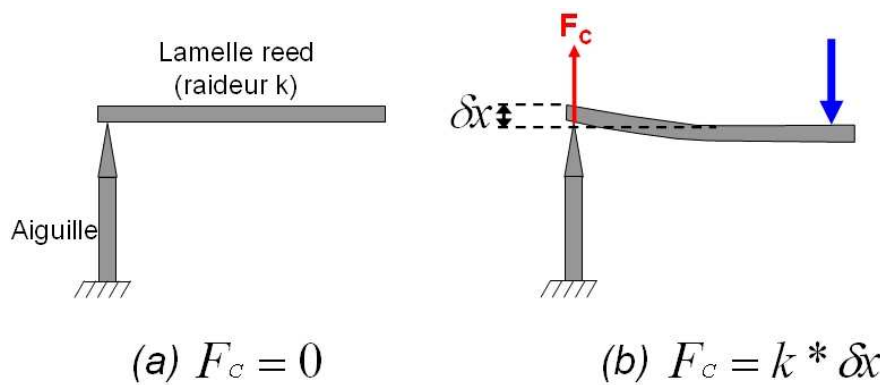


Figure 72. Principe de l'application de la force de contact dans notre système.

La raideur de la lamelle est donc un paramètre important. Nous avons choisi de travailler avec des lamelles prélevées sur des ampoules reed de 52 mm de long, pour faciliter leur manipulation. Ces lamelles ont alors les propriétés suivantes (cf. Tableau 15).

Longueur utile	Largeur	Epaisseur
18,5 mm	2,5 mm	550 μm

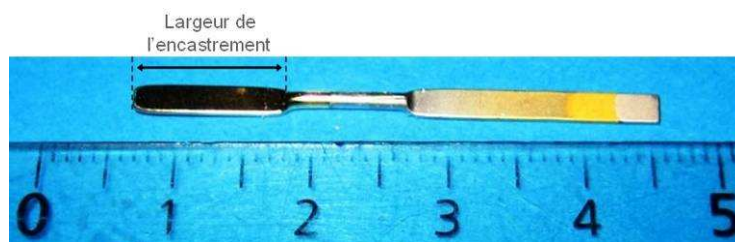


Tableau 15. Lamelle reed utilisée sur le banc.

La lamelle sera maintenue par la partie rectangulaire visible sur la gauche de la photo insérée dans le Tableau 15. La raideur de la lamelle est alors régie uniquement par la partie centrale cylindrique et la partie rectangulaire visible sur la droite de la même photo. Ces lamelles sont faites en Fe80Ni20, matériau qui possède un module d'Young de 180GPa. Nous pouvons alors aisément calculer la raideur de chaque portion de la lamelle et nous réalisons que la partie de section cylindrique possède une raideur 30 fois supérieure à la partie de section rectangulaire. La raideur du système est alors d'environ 2900 N/m, raideur de la partie rectangulaire (à droite sur la photo). Dans ces conditions, la figure suivante présente l'évolution calculée de la force de contact lamelle/aiguille en fonction du déplacement vertical imposé à la lamelle.

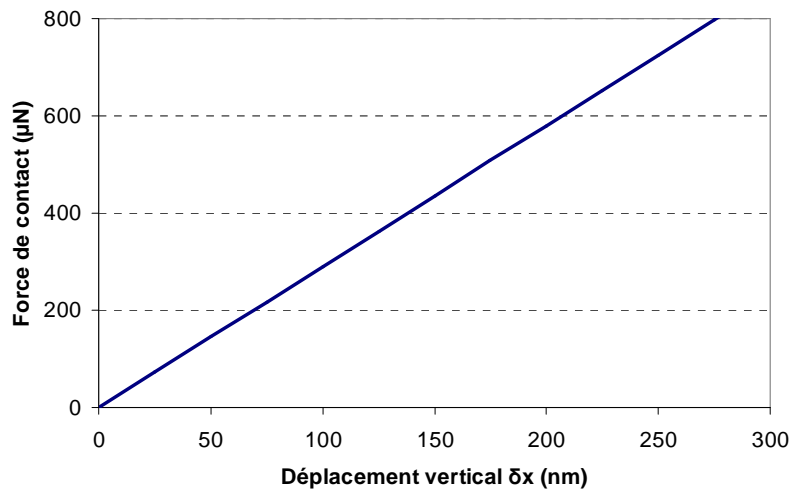


Figure 73. Evolution calculée de la force de contact en fonction du déplacement vertical imposé à la lamelle.

Si nous souhaitons exploiter ce principe, il nous faut donc être capable de déplacer la lamelle avec une résolution de l'ordre du nanomètre. Chaque nanomètre de déplacement vertical correspond en effet à environ $3\mu N$ de force de contact. Ces déplacements très réduits ont un avantage toutefois, ils permettent de toujours rester dans le domaine de déformation élastique de la lamelle. De plus, lorsque le contact sera ouvert nous nous assurerons aussi de rester dans ce domaine, et ceci nous garantit qu'à chaque cycle la lamelle retrouvera sa position initiale et la force de contact restera ainsi constante.

Il s'agit donc de trouver maintenant deux composants essentiels du banc : un actionneur avec la précision dont nous avons besoin et un capteur de force capable de mesurer les forces que nous souhaitons appliquer.

Du côté de l'actionneur, un actionneur piézoélectrique semble le mieux approprié. Deux fabricants principaux existent dans ce domaine : Newport (USA) et Physik Instrumente (Allemagne). PI propose des actionneurs possédant une résolution d'un nanomètre bien adaptés à notre besoin mais qui coûtent plusieurs milliers d'euros, incompatibles avec notre budget. L'actionneur le plus précis de Newport est un vérin piézoélectrique possédant une résolution de 10nm (NanoPZ PZA12). Notre objectif étant d'appliquer quelques centaines de micronewtons de force de contact, une telle résolution nous suffit, un pas correspondant alors à $30\mu N$. De plus, l'avantage de ce vérin est qu'il possède un grand débattement (12.5mm) et son pilotage est facilité grâce à l'utilisation d'un joystick manuel aisément interfaçable avec Labview. De plus, le kit composé de l'actionneur, de son joystick de commande et des connexions et logiciels adaptés ne coûte que 1000 euros.

Pour le capteur de force, diverses solutions existent pour mesurer des forces aussi faibles que les nôtres. Pour des raisons de simplicité du dispositif, nous ne souhaitons pas utiliser des méthodes telles qu'une mesure de déplacement par interférométrie laser ou à l'aide d'un capteur capacitif. La méthode de prédilection pour mesurer des forces faibles est d'utiliser un capteur de déplacement inductif tel que celui utilisé dans les balances de précision. Un tel dispositif permet d'obtenir une précision de l'ordre de $0.1mg$ ($=1\mu N$), mais coûte 7500 euros (Mettler Toledo WM124) et est donc hors budget. La solution que

nous avons adoptée est alors un capteur personnalisé en provenance de chez SMD Sensors (UK), qui possède une résolution de $10\mu\text{N}$ (S251 custom). Le capteur se compose d'un corps d'épreuve équipé de quatre jauges de contraintes semiconductrices montées en pont de Wheatstone et ne coûte qu'une centaine d'euros.

Maintenant que nous sommes sûrs que le principe que nous avons imaginé est réalisable, la phase de conception mécanique et de réalisation peut commencer. La figure suivante résume alors le principe de fonctionnement retenu pour la conception du banc d'endurance.

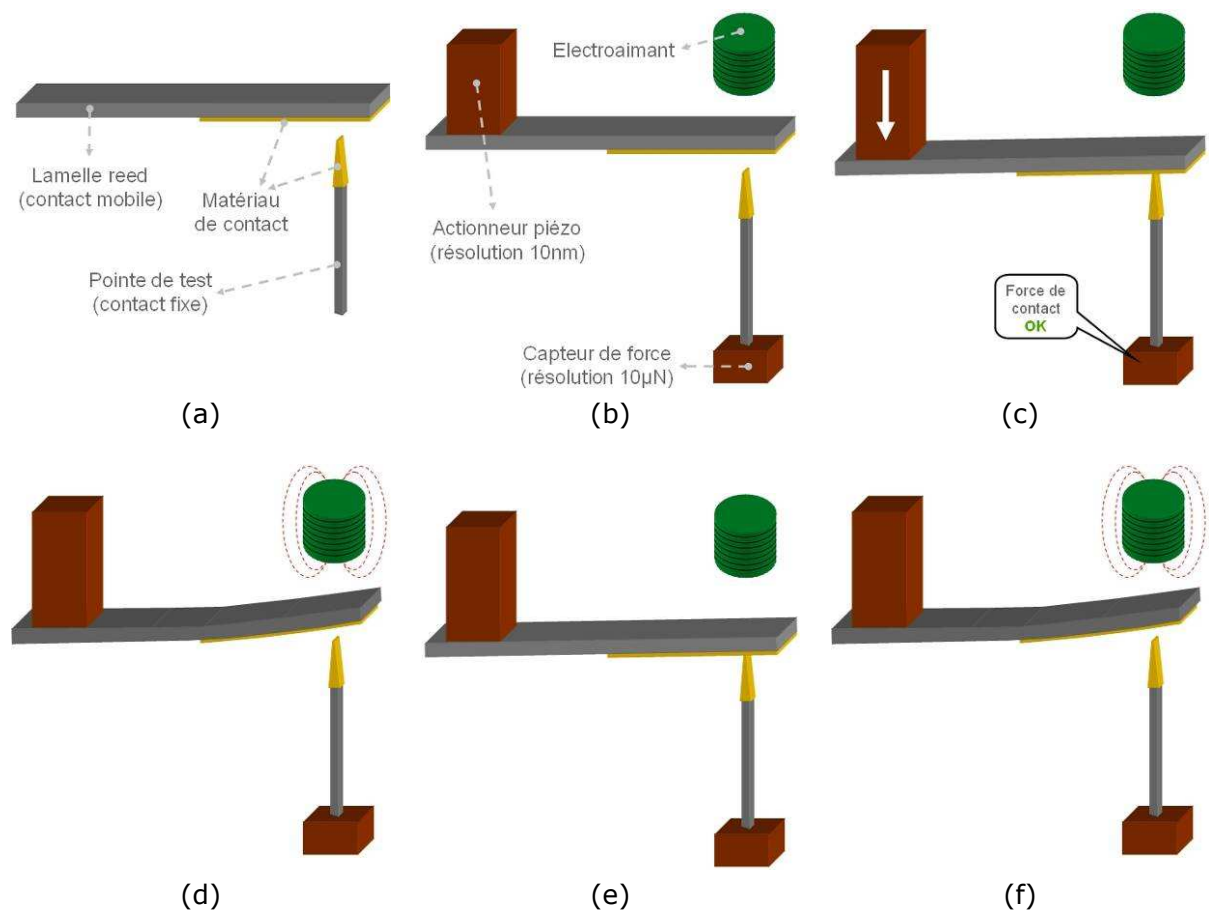


Figure 74. Principe de fonctionnement du banc de test.
 (a) Véhicules de test. (b) Composants principaux du banc. (c) Application de la force de contact grâce à l'actionneur piézoélectrique. (d) Activation de l'électroaimant : ouverture du contact. (e) Arrêt du signal envoyé à la bobine : fermeture du contact. (f) Idem à l'étape d : principe du cyclage.

3.4. Conception mécanique du banc

Une fois validé le principe du banc de test, la phase de conception mécanique a été réalisée sous Pro/Engineer par l'équipe de conception mécatronique de Schneider Electric. Le résultat de cette conception est présenté sur la Figure 75 ci-après.

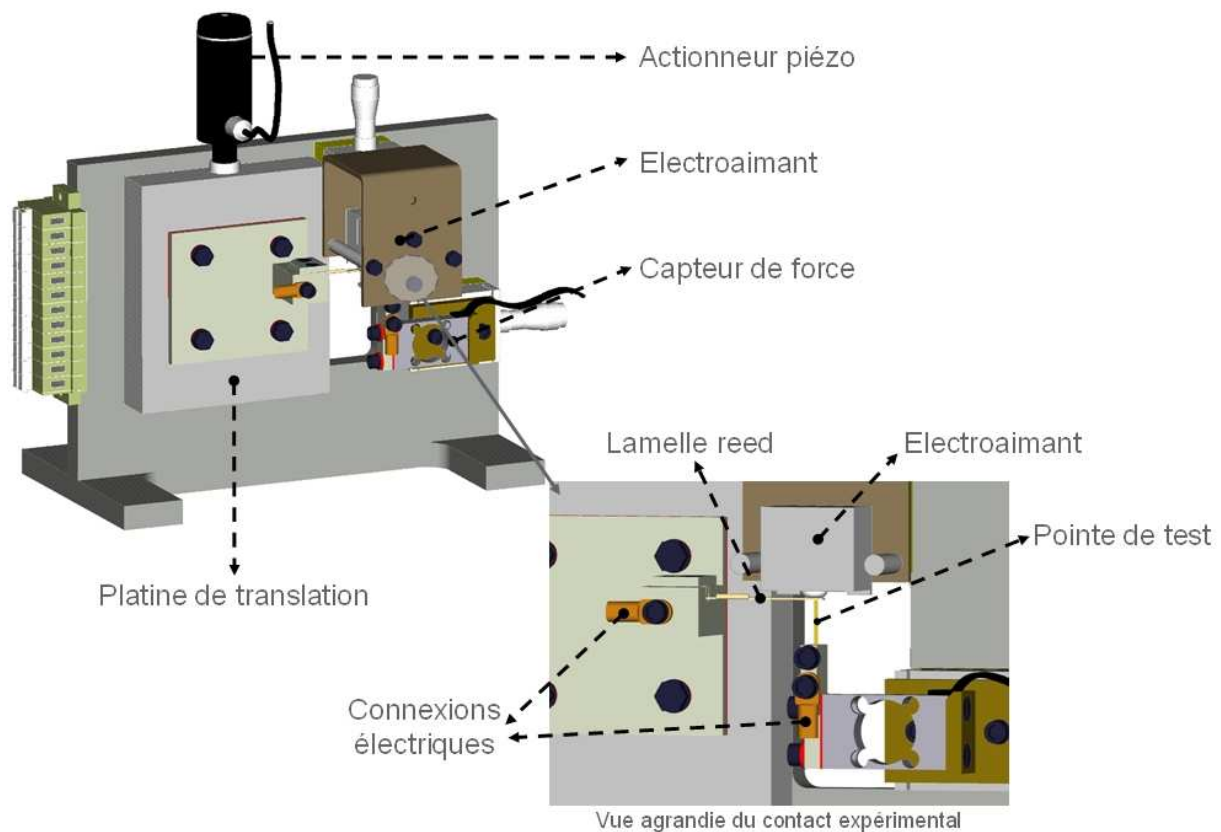


Figure 75. Schéma de conception du banc de test par CAO sous Pro/Engineer.

Comme nous le remarquons le système conçu est compact et peut aisément loger dans l'enceinte hermétique dont nous disposons. Les trois platines de translation utilisées sont des platines Newport. L'actionneur piézoélectrique est fait pour s'adapter sur la platine M-UMR8 et permet de déplacer verticalement la lamelle reed pour l'amener en contact avec la pointe de test. Les deux autres platines de translation permettent de régler la hauteur de la bobine par rapport au contact et de déplacer horizontalement l'aiguille de test pour la placer précisément sous la lamelle. Ces platines ont une précision de $10\mu\text{m}$ et sont des versions adaptées à une utilisation sous vide et donc dépourvues de lubrifiants volatils pouvant contaminer nos surfaces de contact.

Le capteur de force est fixé directement sous la pointe et permet de mesurer la force de contact appliquée par la lamelle sur la pointe. Les connexions électriques de la lamelle et de la pointe sont réalisées directement sur leurs pièces de support respectives, pièces isolées du reste du montage grâce à un isolant polymère de 2mm d'épaisseur (visible en rouge sur la Figure 75). L'ensemble des pièces composant le banc de test a ensuite été réalisé dans un alliage d'aluminium (AU4G) par le laboratoire de mécanique de Schneider Electric. Cet alliage possède l'avantage, entre autres, d'être amagnétique et ne perturbera donc pas notre système d'actionnement magnétique. La Figure 76 présente alors des photographies du montage final.

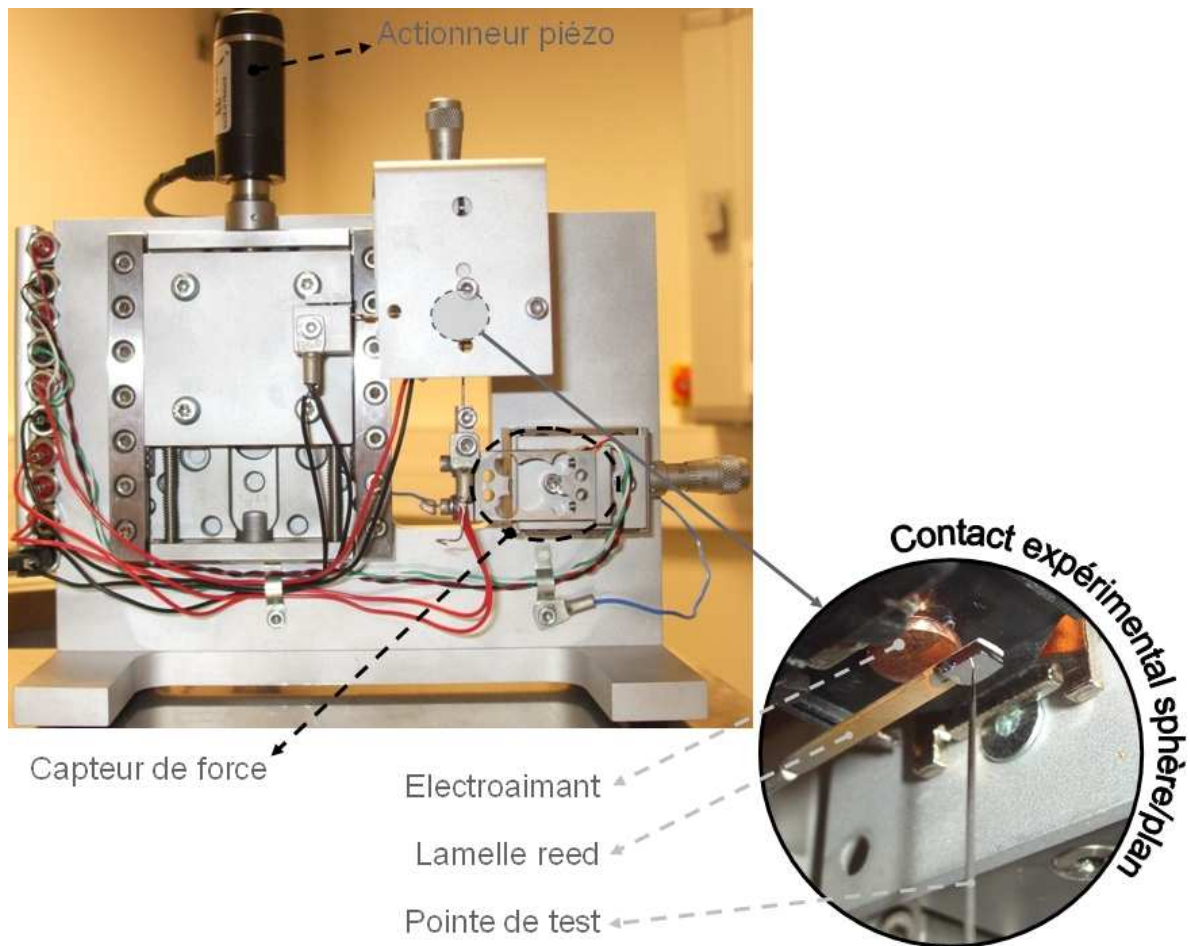


Figure 76. Photographie du banc de test après fabrication, assemblage et câblage.

L'ensemble des connexions électriques nécessaires au fonctionnement du dispositif sont reportées sur un bornier relié aux connexions traversantes de l'enceinte hermétique dans laquelle le banc est logé (cf. Figure 77). L'enceinte est équipée d'une pompe primaire permettant d'atteindre un vide de l'ordre de 10^{-3} mbar et d'une vanne d'admission permettant son remplissage avec de l'azote ou tout autre gaz neutre. L'enceinte est montée sur une table anti vibrations à plateau de marbre.

Nous remarquons sur l'agrandissement présent en Figure 76 qu'une pastille de contact est collée sur l'extrémité de la lamelle reed. Nous verrons dans le paragraphe suivant que nous avons eu recours à cette technique pour obtenir une rugosité répondant à notre cahier des charges.

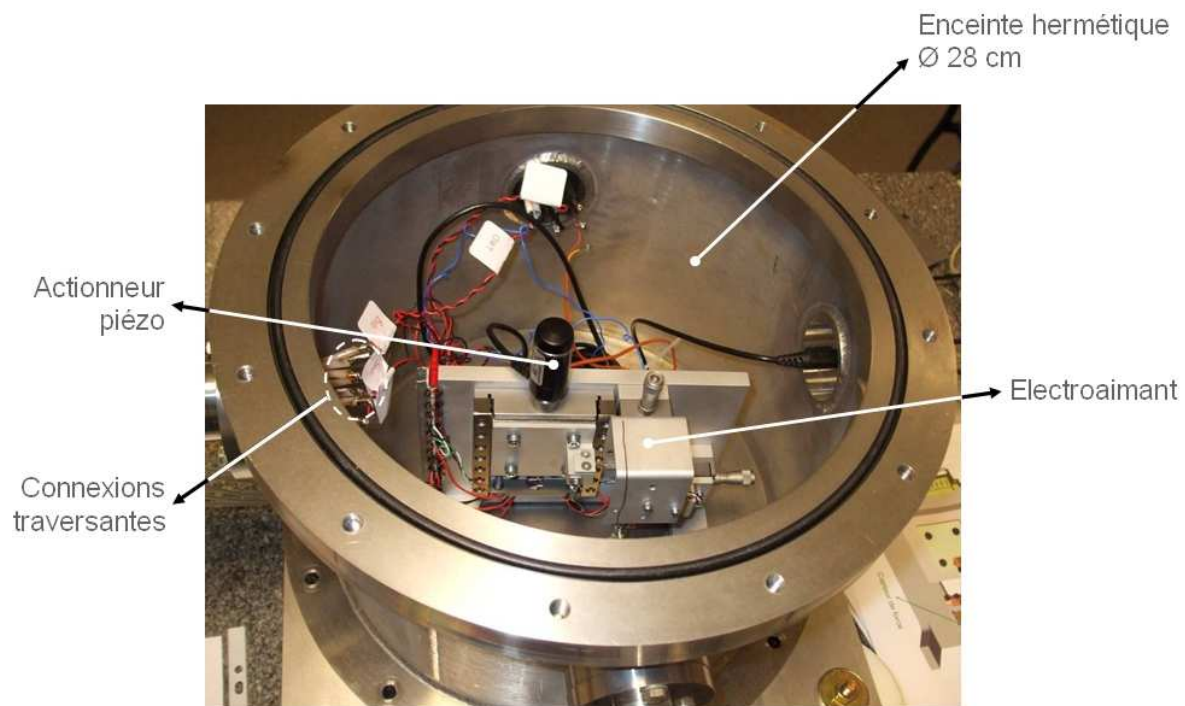


Figure 77. Banc de test placé dans l'enceinte hermétique.

3.5. Instrumentation et pilotage

Le fonctionnement du banc de test nécessite l'utilisation de différents appareils de mesure.

- (1) L'actionneur piézoélectrique possède son propre système d'actionnement, nous l'avons vu.
- (2) La mesure de force est assurée grâce à un multimètre numérique Keithley 2700 utilisé en voltmètre et l'alimentation du capteur de force (10V continu) est assurée par un Keithley 2400.
- (3) Le signal de pilotage de la bobine est délivré par un générateur de fonctions Tektronix AFG310.
- (4) La charge à commuter lors des tests de *hot switching* est une charge résistive. Un générateur de tension TTI TSX3510 est utilisé pour délivrer une tension constante tandis que le courant est limité à l'aide d'une résistance placée en série.
- (5) La mesure de résistance de contact est assurée par un Keithley 2400 connecté en 4 fils. L'intensité du courant continu utilisé pour la mesure est la même que celle utilisée pour le *hot switching*.
- (6) Une matrice de commutation HP 3499A est utilisée pour commuter entre le signal de *hot switching* et le circuit de mesure de résistance. Ces deux circuits ont été séparés pour éviter d'utiliser un multimètre Keithley en tant que source pour le *hot switching*¹⁵.

¹⁵ Lors de commutations rapides nous avons observé qu'un multimètre Keithley passe par des états transitoires pendant lesquels la tension et le courant prennent des valeurs très différentes des valeurs de consigne fixées.

Le schéma de principe du montage électrique est alors présenté en Figure 78, le contrôle de l'actionneur piézoélectrique ainsi que la mesure de force de contact n'étant pas représentés sur cette figure.

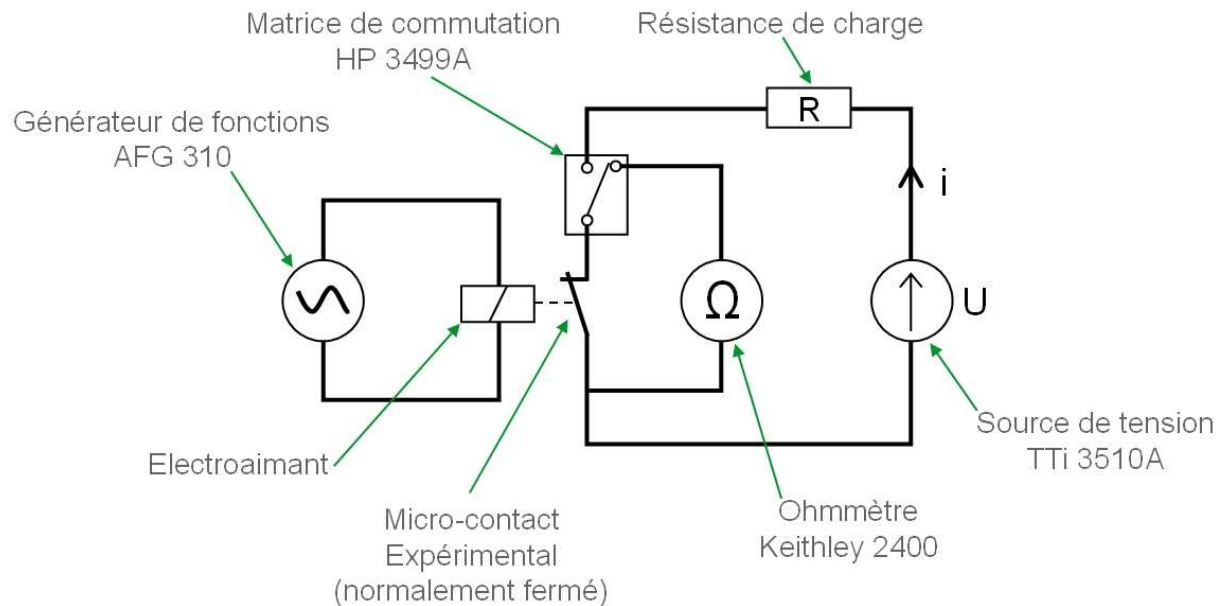


Figure 78. Schéma de principe du montage électrique mis en œuvre sur le banc.

L'électroaimant permettant d'ouvrir le contact, qui est dans la configuration « normalement fermé », est monté sur une platine de translation dans le but de pouvoir régler sa distance par rapport à la lamelle. Cette distance conditionne la valeur de la tension de commande nécessaire à l'ouverture du contact et la distance inter-contacts lorsque le contact est ouvert. Les distances électroaimant/lamelle typiques utilisées sont de quelques dizaines de microns, ce qui engendre des tensions de commande de 2V maximum.

La forme de ce signal de commande a été choisie sinusoïdale pour permettre de relâcher la lamelle progressivement et donc éviter que le contact ne se referme trop brusquement et engendre une force trop importante lors de son impact sur l'aiguille, ou des rebonds. Nous nous assurerons de son efficacité dans le paragraphe suivant. Des relevés à l'oscilloscope du signal de commande et du signal passant dans le contact sont présentés sur la Figure 79.

La fréquence de ce signal est ajustable et le dispositif a été testé avec succès à des fréquences allant jusqu'à 50 Hz. Une telle fréquence de test permet de réaliser plus de 4 millions de cycles par jour, valeur tout à fait adaptée à la réalisation de tests d'endurance en *hot switching*.

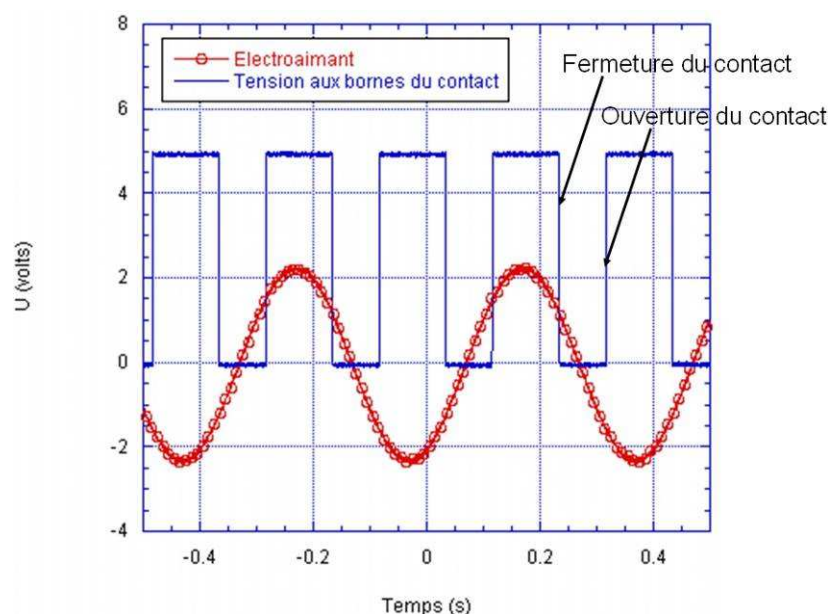


Figure 79. Oscillogrammes de la tension envoyée à l'électroaimant et de la tension aux bornes du contact.

Un programme Labview a été développé pour piloter l'ensemble de ces équipements par GPIB (et RS232 pour l'actionneur piézoélectrique) et acquérir les données lors des cyclages. Le programme permet de configurer tous les paramètres nécessaires au bon fonctionnement du banc. Les informations suivantes sont enregistrées au cours du cyclage, tous les x cycles : la force de contact, la résistance de contact à l'état fermé, la résistance de contact à l'état ouvert.

Durant le cyclage les informations ne sont pas collectées pour chaque cycle mais tous les x cycles, x étant paramétrable entre 1 et 10000. La force de contact mesurée est comparée à la consigne fixée au début du test et une boucle de régulation a été mise en place pour maintenir cette force de contact dans une gamme de $\pm 50\mu\text{N}$ par rapport à la force de contact fixée. Une telle régulation est indispensable pour compenser les dilatations thermiques de notre système et le fluage du capteur de force, surtout si les tests durent plusieurs jours.

Différents critères peuvent être réglés pour stopper le cyclage : un nombre de cycles défini, une valeur de résistance de contact qui dépasse un seuil fixé ou une valeur de résistance à l'état ouvert inférieure à un seuil fixé. Un programme Labview additionnel permet d'étudier le comportement de la résistance de contact en fonction de la force de contact appliquée.

4. Caractérisation et qualification du banc

Maintenant que le banc et son pilotage sont opérationnels, nous devons nous assurer que son comportement est reproductible et que nous avons bien réussi à reproduire un micro-contact. Cette phase de caractérisation du banc a pris énormément de temps et n'a pas été forcément la plus intéressante mais elle était indispensable. Tous les tests présentés ont été effectués sous azote à pression atmosphérique, condition nécessaire à la stabilité mécanique du système et utile pour éviter la contamination des surfaces de contact.

4.1. Véhicules de test

Comme nous l'avons vu précédemment, nous utilisons comme véhicules de test des éléments disponibles dans le commerce qui sont tous les deux des éléments constitutifs d'un contact électrique dans leur utilisation normale. Ceci nous garantit déjà que leur état de surface, d'un point de vue contamination, est adapté à notre utilisation, ce qui a été vérifié à l'aide d'analyses EDX. Plusieurs problèmes se sont posés cependant lors de l'utilisation de cette lamelle reed et de la pointe de test.

L'idée initiale était de déposer les matériaux de contact à tester directement sur ces véhicules de test. Le dépôt en lui-même ne pose pas de problème particulier, il devait être réalisé sur une machine de pulvérisation cathodique disponible chez Schneider Electric. Cependant des mesures de rugosité ont été réalisées à l'aide d'un AFM sur les lamelles reed et il s'avère que cette rugosité est de l'ordre de 210nm. Or, la rugosité typique des électrodes d'un micro-contact est de quelques nm, 10 tout au plus et nous avons vu qu'avec les faibles forces utilisées le comportement du contact électrique est très dépendant de la rugosité. Nous n'aurons donc pas un véhicule de test représentatif en déposant les matériaux de contact directement sur une surface de rugosité si élevée.

La solution la plus simple qui a été trouvée est alors de déposer les matériaux sur des wafers de silicium. Ces wafers sont ensuite clivés en carrés de quelques mm de côté et un carré est collé sur la lamelle reed à l'aide d'une colle UV. Le contact électrique est repris sur la surface de contact soit par *wire bonding* soit à l'aide de laque d'argent. La Figure 80 illustre ce procédé et explique la présence d'une pastille à l'extrémité de la lamelle sur la Figure 76.

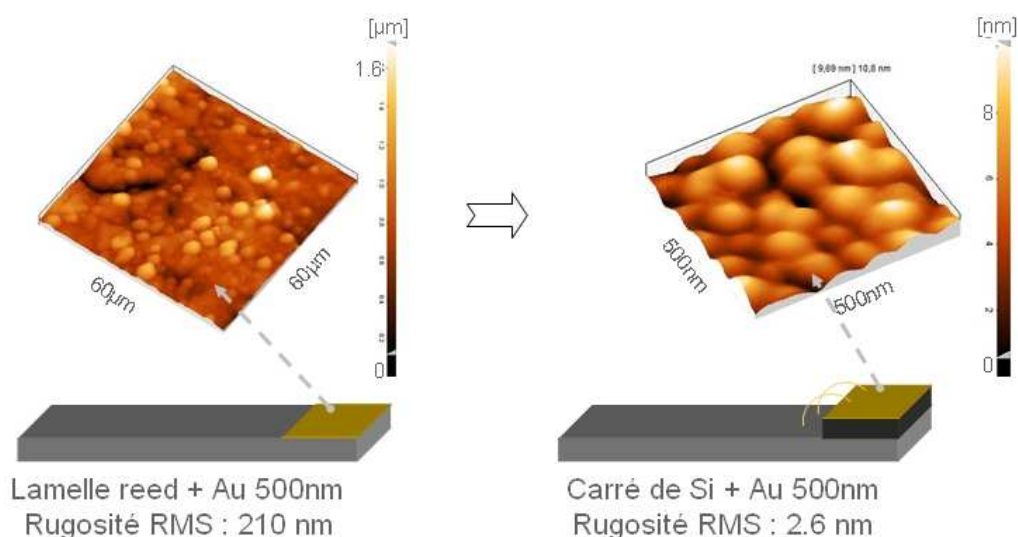


Figure 80. Adaptation de la rugosité de la lamelle au cahier des charges.

Cette approche permet, de plus, d'avoir accès à une gamme plus large de matériaux. Le dépôt ne se limite plus aux matériaux dont nous disposons dans notre machine de pulvérisation, l'ensemble des matériaux disponibles en salle blanche nous est accessible. Leur simple dépôt sur un wafer nécessite très peu de temps et est suffisant pour notre usage. Malheureusement le dépôt de matériaux sur les pointes de test est plus complexe. Pour gagner du temps nous avons alors eu recours à des pointes de différentes natures.

Les pointes disponibles commercialement sont généralement en carbure de tungstène ou en tungstène. Ces matériaux sont beaucoup plus durs que l'or, et il n'est donc pas judicieux de déposer de l'or par-dessus. Etant donné que nous souhaitons tester l'or sur notre banc de test, pour le prendre comme référence, nous nous sommes alors procurés des pointes en cuivre béryllium (CuBe) qui présentent une dureté de 3250 MPa, plus faible que les pointes standard. Ces pointes ont été approvisionnées chez American Probes & Technologies dans leur version plaquée or (300-400nm d'épaisseur obtenue par dépôt électrolytique) avec un rayon de courbure de 10 μ m et 20 μ m (cf. Figure 81).

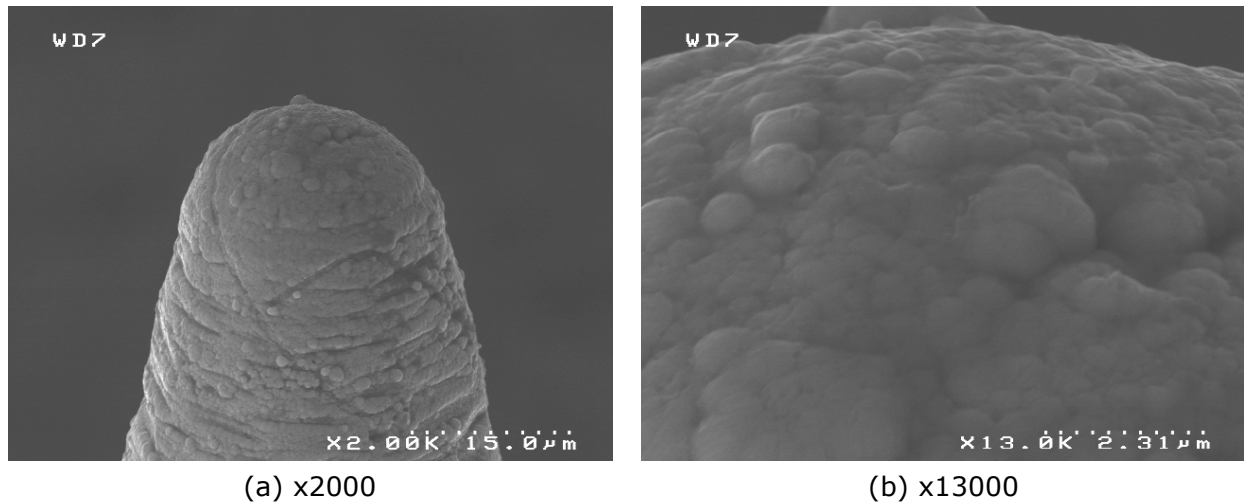


Figure 81. Observation MEB d'une pointe en CuBe dorée possédant un rayon de courbure de 10 μ m.

Il est difficile de caractériser leur rugosité à l'AFM, mais nous remarquons qu'elles présentent une rugosité plus proche de la centaine de nanomètre que du nanomètre. Nous n'avons cependant pas le choix, il nous faudra utiliser ces pointes telles quelles. Maintenant que nous nous sommes assurés que les véhicules de test que nous utilisons sont adaptés à notre étude, intéressons-nous à la force de contact.

4.2. Capteur de force

Comme précisé dans le paragraphe précédent, le capteur de force dont nous nous sommes dotés est un capteur à jauges de contrainte. Le montage de quatre jauges en pont de Wheatstone permet en théorie de compenser les dérives thermiques et de garantir un comportement linéaire au capteur. Les caractéristiques du capteur nous ont été fournies par le fabricant mais il nous faut nous assurer qu'elles sont correctes. Pour cela nous avons procédé à une calibration du capteur à l'aide de masses marquées et le résultat est présenté sur la Figure 82.

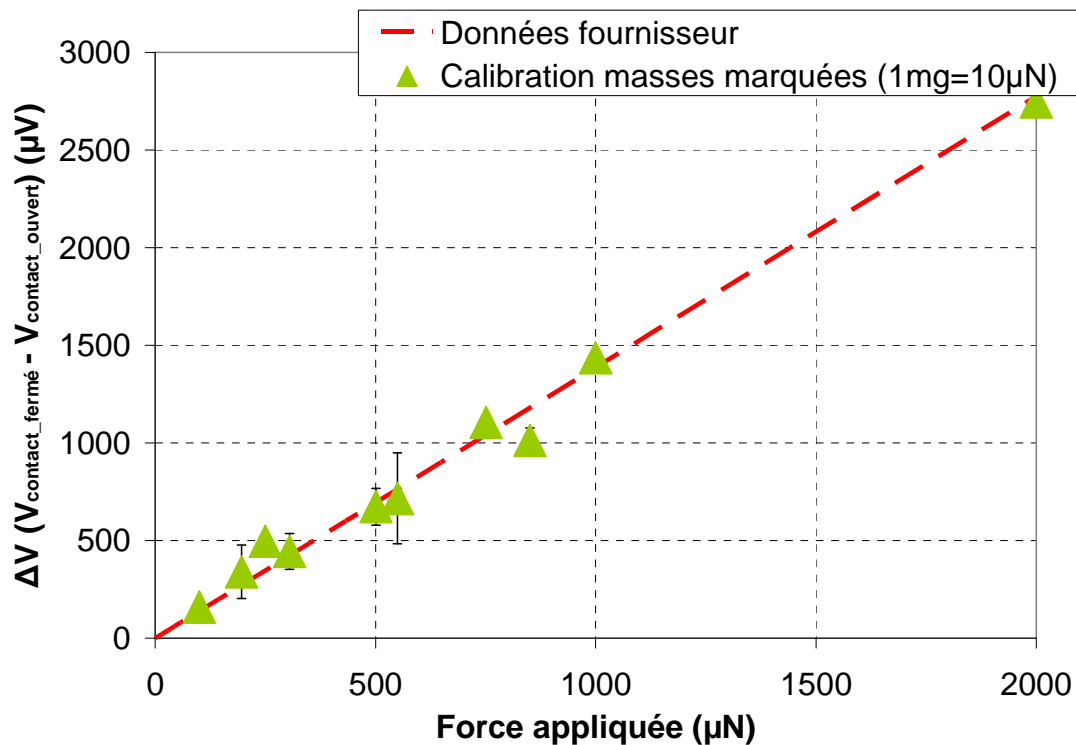


Figure 82. Calibration du capteur de force à l'aide masses marquées.

Nous remarquons que le comportement du capteur est conforme aux données fournisseur. Toutefois pour obtenir une résolution optimale, nous devons réaliser nos mesures en mode différentiel : la force de contact est obtenue en réalisant une mesure contact ouvert suivie d'une mesure contact fermé. La différence entre les deux mesures nous fournit la force de contact. Le signal obtenu est assez faible, quelques centaines de microvolts pour la gamme de force où nous souhaitons travailler mais l'appareil Keithley 2700 permet d'atteindre la résolution souhaitée. Il faut toutefois noter que le signal de sortie d'un tel capteur est directement proportionnel à son signal d'alimentation. Alimenter le capteur avec une source très stable est donc indispensable, et nous avons opté pour une solution coûteuse mais efficace : un Keithley 2400 utilisé en source de tension continue (10V).

Le problème d'un tel capteur est sa dérive temporelle, liée d'une part au fluage du corps d'épreuve et d'autre part aux dilatations thermiques. Nous avons ainsi mis en évidence que si nous maintenons le contact fermé avec une force de 500μN, 4h plus tard le contact s'est rouvert. Le fluage a donc pour effet de réduire progressivement la force de contact, en entraînant sous l'effet de la gravité l'aiguille vers le bas. De plus, un thermocouple a été placé dans l'enceinte, au plus près du capteur et les variations de température ainsi que la force de contact ont été enregistrées toutes les minutes pendant 2 jours. Nous avons alors constaté que la structure du capteur était extrêmement sensible aux variations de températures, même de l'ordre de 0,1°C.

Pour compenser toutes ces dérives, une boucle de régulation a été implémentée dans le programme de pilotage du banc de test. Cette boucle permet d'ajuster verticalement la position de la lamelle reed grâce à l'actionneur piézoélectrique, et donc de réguler la force. Ainsi, tous les x cycles, lorsque la force de contact est mesurée, le programme la compare à la consigne fixée et si cette force a dérivé de ±50μN, l'actionneur

piézoélectrique modifie la position verticale de la lamelle pour rapprocher la force de la consigne. Une telle boucle nous permet alors de conserver une force de contact stable, avec un écart type de l'ordre de $30\mu\text{N}$.

4.3. Sensibilité du dispositif

Une fois notre capteur de force qualifié, nous procédons à des tests pour nous assurer que notre dispositif est assez sensible. Pour cela, nous réalisons des séquences de mesure de résistance de contact en fonction de la force de contact. Une pointe en CuBe dorée possédant un rayon de courbure de $20\mu\text{m}$ est utilisée comme contact fixe. Un carré de silicium oxydé et recouvert de 500nm d'or déposés par pulvérisation est collé sur l'extrémité d'une lamelle reed et fait office de contact mobile. A l'aide d'un programme Labview que nous avons développé, nous contrôlons précisément l'approche de la lamelle grâce à l'actionneur piézoélectrique tout en mesurant simultanément la résistance de contact et la force de contact. La mesure de résistance se fait à l'aide d'un Keithley 2400 connecté en 4 fils, le courant de mesure étant maintenu à 1mA .

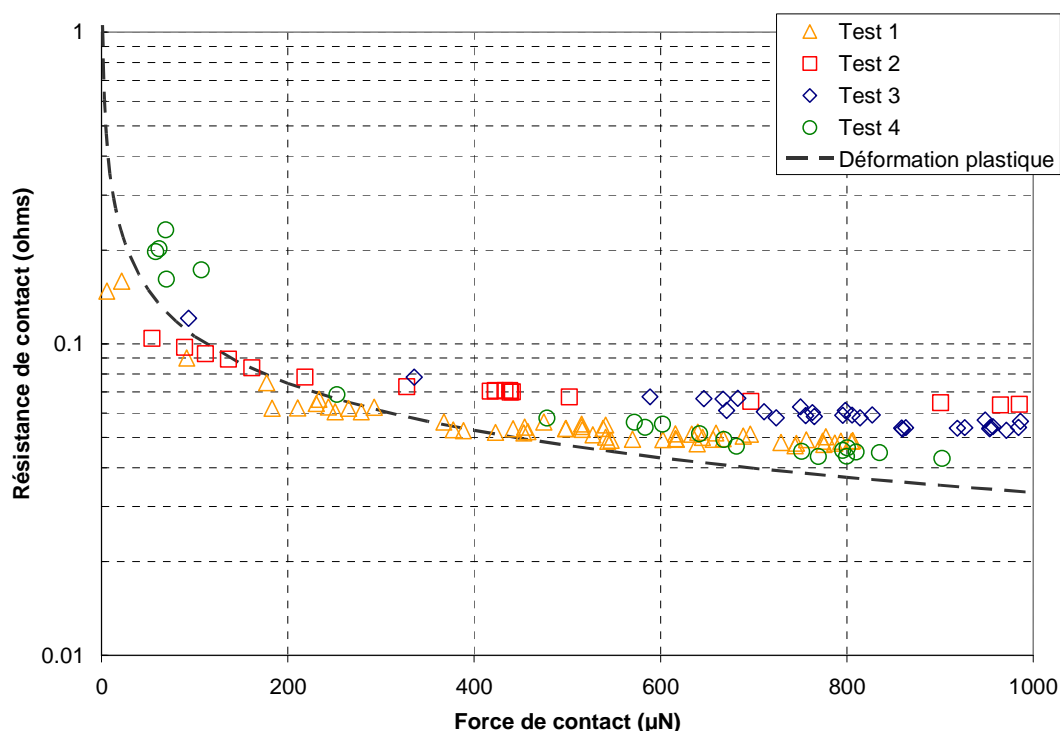


Figure 83. Mesure de la résistance de contact en fonction de la force appliquée pour un contact Or-Or à quatre endroits différents dans le plan.

Nous remarquons que la résistance de contact présente un comportement classique, diminuant lorsque la force de contact augmente. Une estimation de la valeur de la résistance à l'aide d'un modèle de déformation purement plastique comme présenté dans le chapitre 1 donne un résultat proche de la mesure (l'offset de résistance lié à la contribution de la chaîne de mesure a été ajouté au modèle). La force de contact nécessaire à l'obtention d'un contact stable est de l'ordre de $150\mu\text{N}$, traduisant probablement des surfaces contaminées. Il faut noter toutefois que la mesure de la force de contact pour des valeurs inférieures à $150\text{--}200\mu\text{N}$ est difficile, le signal délivré par le

capteur étant très faible (cf. Figure 82). Nous observons aussi que la résistance de contact tend vers une asymptote aux forces élevées, phénomène déjà discuté dans le premier chapitre et qui traduit l'utilisation de matériaux en couches minces.

Près d'une quinzaine de tests de ce type ont été menés sur l'or et les comportements sont reproductibles, montrant que le montage possède une résolution adaptée à notre besoin. La partie statique du banc de test (application et mesure de la force de contact) est donc qualifiée, il faut maintenant étudier le comportement du banc lors de cyclages.

4.4. Comportement en cyclage

Pour tester le banc nous utilisons les mêmes échantillons que précédemment. Nous procédons à des cyclages à 10Hz et sans courant, la résistance est simplement mesurée tous les 1000 cycles avec un courant de 1mA. La consigne de la force de contact est fixée à 300 μ N et est contrôlée tous les 1000 cycles aussi, et ce pendant 580 000 cycles. L'évolution typique de la résistance et de la force de contact en fonction du nombre de cycles est présentée sur la Figure 84.

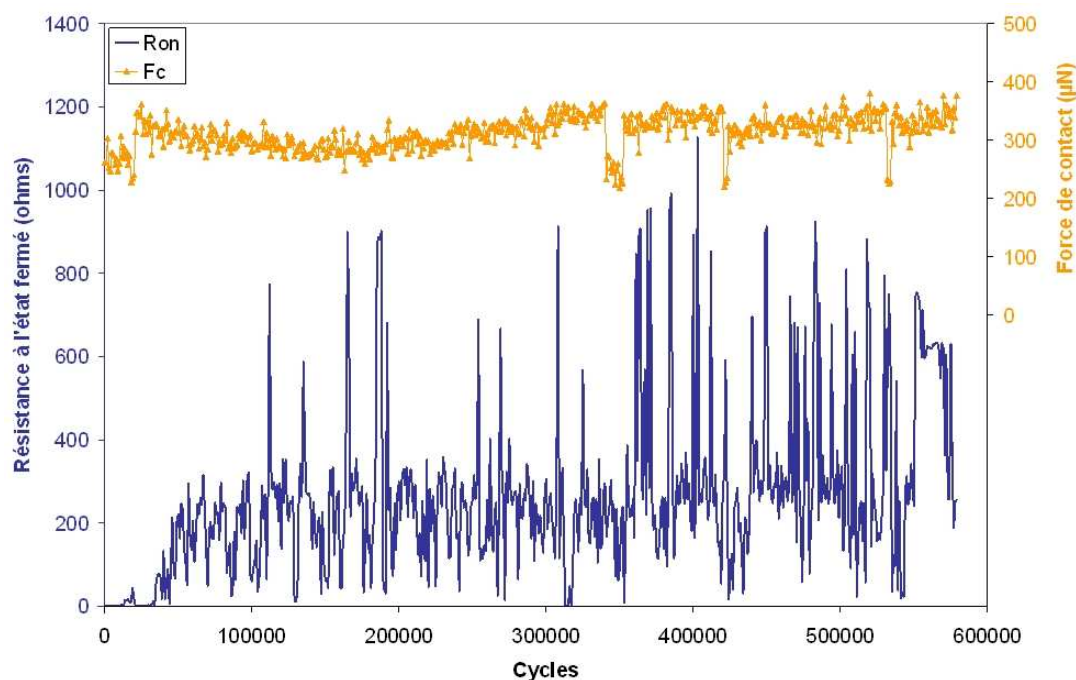


Figure 84. Evolution de la force de contact et de la résistance de contact en fonction du nombre de cycles effectués. Contact Or-Or, durée du test environ 16h.

Concernant la force de contact, nous remarquons que celle-ci reste globalement à $\pm 50\mu$ N de la consigne 300 μ N durant le test. Nous pouvons noter que la régulation joue bien son rôle : lorsqu'il arrive que la force chute en dessous de 250 μ N, valeur basse de l'intervalle de régulation, la force est réajustée en quelques cycles à 300 μ N. Notre banc de test se comporte donc convenablement, même lors de tests d'endurance de longue durée.

La résistance subit des variations importantes. Initialement sa valeur est aux alentours de quelques centaines de milliohms, valeur cohérente avec les mesures effectuées précédemment. Cependant au bout de 30 000 cycles elle augmente progressivement pour atteindre plusieurs centaines d'ohms. Un tel comportement laisse présager

l'apparition de contamination carbonée, comme observé sur le micro-interrupteur dans le chapitre précédent. Des analyses des surfaces de contact à l'issue du test le confirmeront (cf. Figure 85).

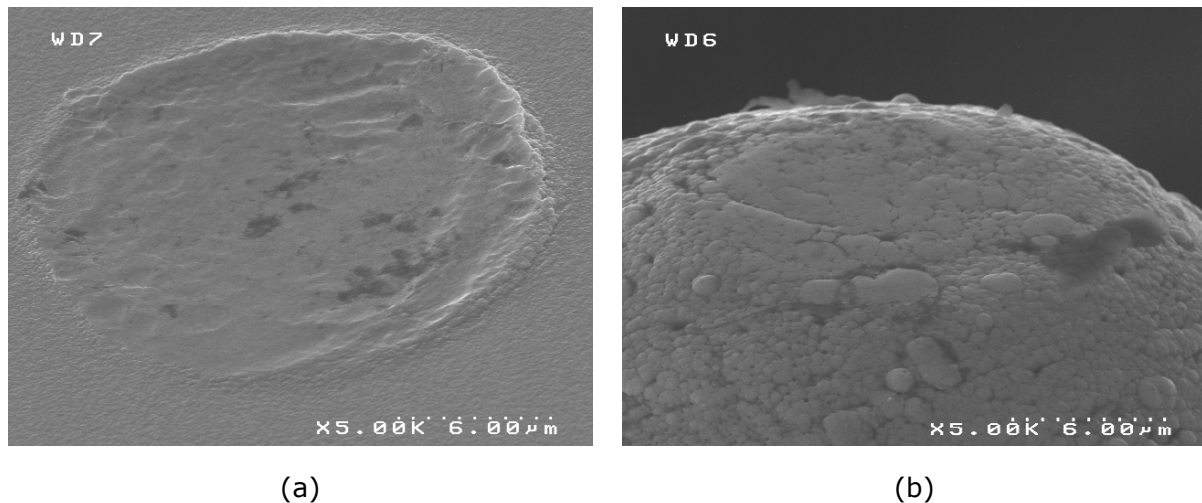


Figure 85. Observation des zones de contact au MEB à l'issue du test présenté en figure précédente. (a) Elément mobile (substrat). (b) Elément fixe (pointe).

L'observation du contact mobile (Figure 85 – a) révèle la présence d'une zone de contact de 20µm de diamètre ayant subi des déformations plastiques. Des traces de contamination carbonée sont visibles dans cette zone ainsi que sur le contact mobile (Figure 85 – b). Des analyses EDX sur ces zones révèlent que la contamination observée est majoritairement composée de carbone. Il s'agit donc du même type de contamination que sur le micro-interrupteur. Les tests ont cependant été réalisés en *cold switching*, alors qu'ils étaient réalisés en *hot switching* sur le micro-interrupteur. L'apparition de contamination carbonée dans ces conditions révèle donc que les pointes de test sont probablement extrêmement contaminées. Des analyses EDX sont alors réalisées sur des pointes neuves et la présence de carbone est mise en évidence. Le dépôt de l'or par voie électrolytique n'est donc pas adapté à notre utilisation si aucune procédure de nettoyage n'est réalisée.

La taille de la zone de contact semble plus grande que la valeur attendue. La force de contact a pourtant été soigneusement réglée à 300µN tout au long du test. Il semble possible que la force d'impact, lorsque la lamelle est relâchée par la bobine soit plus importante que la force de contact. Si c'est le cas, cela est assez problématique car un tel comportement n'est pas du tout représentatif d'un MEMS. Les MEMS présentent la particularité de mettre en jeu des parties mobiles qui ont des masses quasiment négligeables et des déplacements réduits, ce qui engendre des forces d'impact quasiment inexistantes.

4.5. Evaluation de la force d'impact

La force avec laquelle la lamelle entre en contact avec l'aiguille lorsque le signal de commande de la bobine est coupé constitue la force de contact que nous souhaitons évaluer. Pour ce faire, nous procédons à une série de test en appliquant une force de contact définie puis en procédant à un unique cycle de commutation. Nous mesurons

ensuite au MEB le rayon r de la zone de contact ainsi générée. En faisant l'hypothèse d'une déformation purement plastique et en connaissant la dureté de l'or des échantillons que nous utilisons (mesurée à l'aide d'un nanoindenteur : $H_{Au} \approx 1.3 \pm 0.2 \text{ GPa}$), nous pouvons calculer la force correspondante :

$$r = \sqrt{\frac{F_c}{\pi \cdot H}} \Rightarrow F_c = H \cdot \pi \cdot r^2$$

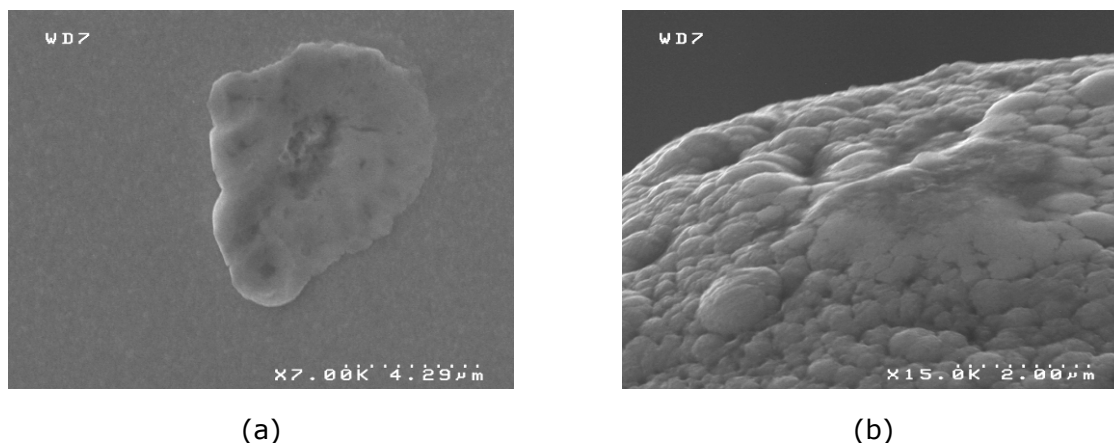
Quatre valeurs de force de contact sont testées chacune trois fois : 300µN, 3mN, 6.5mN et 9.5mN, en réalisant un cycle unique de commutation dans chacun des cas. Les rayons des spots de contact correspondants sont mesurés au MEB et le calcul de la force correspondante indique que les surfaces ont subi une force 2 à 3 fois supérieure à la force appliquée.

Si nous supposons, à juste titre, que la force de contact appliquée est correctement mesurée, ceci indique que la force d'impact est environ 2 à 3 fois supérieure à la force de contact. Ce résultat est toutefois à nuancer car dans ce cas le signal de commande de la bobine a été interrompu brusquement (manuellement), alors que dans le cas de cyclage le signal est sinusoïdal. Nous pouvons donc supposer que lors des cyclages la force d'impact est légèrement réduite par rapport à ce test. Ce point est tout de même problématique car un tel comportement n'est pas représentatif d'un micro-relais.

4.6. Qualification finale du banc

Dans le but de valider définitivement le banc de test, nous procédons à des cyclages en *hot switching* sous 5V/1mA. Une première série de trois tests est effectuée sur le même type d'échantillons d'or que précédemment. Une seconde série de deux tests est effectuée avec une pointe en tungstène d'un rayon de 7µm et un morceau de wafer de silicium oxydé sur lequel est déposé 500nm de ruthénium par pulvérisation. Nous n'avons malheureusement pas de pointe de test recouverte de ruthénium.

Nous procédons alors à des tests d'endurance à une fréquence de 10Hz, en mesurant la résistance et en contrôlant la force de contact tous les 50 cycles pendant 50 000 cycles. Les zones de contact sont ensuite caractérisées au MEB et le résultat pour les contacts or-or est présenté sur la Figure 86.



(a) (b)
Figure 86. Observation des zones de contact à l'issue d'un test de hot switching 5V/1mA. Contact Or-Or, 50000 cycles.
 (a) Contact mobile, anode. (b) Contact fixe, cathode.

Nous remarquons que des traces de contamination carbonée sont présentes sur les surfaces de contact dorées. De plus, un léger transfert de matière dirigé de l'anode vers la cathode est observable. Le type de dégradation observée est donc le même que dans le cas du micro-interrupteur, ce qui nous indique que le banc de test est capable de reproduire certains des mécanismes de défaillance d'un micro-contact. L'observation MEB de l'élément de contact revêtu de ruthénium à l'issue d'un test est présentée en Figure 87 et nous amène à la même conclusion : de probables polymères de friction sont observés en grande quantité sur le contact, comme lors des tests sur le micro-interrupteur.

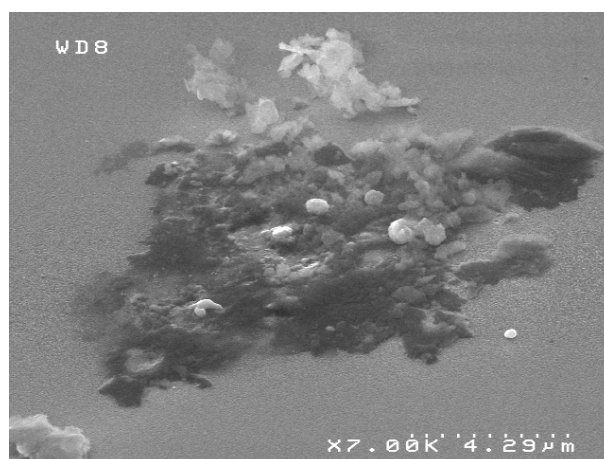


Figure 87. Apparition de polymères de friction sur une surface de ruthénium à l'issue d'un test de hot switching 5V/1mA, 50000 cycles. Élément de contact opposé : pointe en tungstène.

Ces tests montrent que le banc de test développé pourrait être représentatif d'un micro-contact. Les mêmes mécanismes de dégradation que sur le micro-interrupteur sont mis en évidence, ce qui nous laisse penser qu'un matériau testé sur ce banc de test se comportera de la même façon s'il est ensuite intégré dans un micro-interrupteur. Quelques points nécessiteraient d'être améliorés toutefois, notamment la rugosité de la

surface du contact fixe, la force d'impact et les conditions de dépôt des différents matériaux.

5. Application à l'évaluation du tungstène

Dans le domaine des microsystemes, le matériau de contact de prédilection est l'or. La majorité des micro-relais publiés ayant fait l'objet de publications possède des contacts réalisés en or déposés par pulvérisation ou par électrodéposition (ECD), avec des épaisseurs allant de quelques centaines de nanomètres à plusieurs microns. L'or doit sa suprématie à plusieurs qualités. Il s'agit d'un métal noble qui s'oxyde très difficilement, ce qui permet un contact métal-métal optimal, même aux forces réduites des micro-relais. Associé à sa faible dureté, ceci permet d'obtenir un contact électrique stable, même à force faible. La seule contamination « native » de l'or est la présence d'une couche de quelques nanomètres de composés hydrocarbonés, difficilement évitable [Patton2005]. De plus, l'or possède une résistivité parmi les plus basses des métaux, comme en témoigne le Tableau 16.

	T_{fusion} (°C)	Densité à 20°C (g.cm⁻³)	Conductivité thermique 0-100°C (W.m⁻¹.K⁻¹)	Résistivité à 20°C (μΩ.cm)	Coeff. de T° 0-100°C (10⁻³ K⁻¹)	Dureté (HV)
Ag	961	10.5	425	1.63	4.1	25 / 95
Au	1064	19.3	315.5	2.2	4	20-30 / 60
Cu	1084	8.96	397	1.694	4.3	130 / 220
Mo	2615	10.2	137	5.7	4.35	200 / 250
Pd	1554	12.0	75.2	10.8	4.2	40 / 100
Pt	1768	21.45	73.4	10.58	3.92	40 / 100
Rh	1962	12.4	148	4.7	4.4	120 / 300
Ru	2310	12.2	116.3	7.7	4.1	350 / 750
W	3420	19.3	174	5.4	4.8	360 / 500

Tableau 16. Propriétés physiques des matériaux métalliques massifs potentiellement intéressants pour le contact électrique. [Gale2004]

La faible dureté de l'or et sa température de fusion basse constituent toutefois un problème. Ce matériau a tendance à s'éroder rapidement sous l'effet d'arcs électriques ou d'échauffement local. De plus, associées à sa grande ductilité, ces deux propriétés font de l'or un matériau propice au collage permanent des contacts. Ainsi, la majorité des défaillances rapportées lors de l'utilisation de contacts en or dans des micro-relais est un collage permanent des contacts [Coutu2006, Ke2008]. Le second mode de défaillance observé est une augmentation brusque de la résistance de contact liée à la croissance d'une couche de contamination carbonée [Dickrell2007, Kwon2007].

Pour parer aux défauts de l'or, différentes approches ont alors été testées sur des micro-relais. Dans la majorité des cas, une approche identique à celle retenue pour les relais macroscopiques est utilisée : le durcissement de l'or. L'or est couramment durci grâce à l'ajout de Ni ou de Co en faible quantité (de l'ordre de quelques %), il prend alors le nom de « *hard gold* », l'AuNi5 étant le plus répandu de ces alliages [Schimkat1999]. Dans le domaine des micro-relais, l'utilisation de tels alliages a été rapportée à plusieurs reprises

(cf. Tableau 17) et a prouvé leur efficacité. Tout le bénéfice est alors couramment attribué à la dureté plus élevée du matériau [Coutu2006, Yang2009].

Une seconde approche consiste à utiliser des matériaux du groupe platine, comme c'est le cas dans les relais reed : rhodium ou ruthénium principalement. Ces matériaux présentent l'avantage d'avoir une dureté et une température de fusion beaucoup plus élevées que l'or, et une tendance à s'oxyder beaucoup moins marquée que l'argent ou le cuivre par exemple. Ces matériaux ont été utilisés dans des micro-relais, soit sous forme de revêtement additionnel sur l'or [Ke2008], soit pour durcir l'or [Coutu2006, Chen2007], soit en matériau de contact pur [Receveur2006, Chen2007, Kwon2007].

L'augmentation de durée de vie engendrée par ces deux approches est analysée dans le Tableau 17.

	Matériau testé	Conditions de test	Augmentation de durée de vie / Au	Mode de défaillance
Coutu2006	AuPd Au-AuPt AuPtCu	<i>Hot switching</i> 8.2V / N/A	x 3 x 3 x 6	Collage Collage $R_c \uparrow$
Receveur2006	Ru	<i>Cold switching</i> N/A	x 100	$R_c \uparrow$
Chen2007	Rh, Pt, Ru AuRu5, AuPt10	0V	/ 10 - 1000 ≥ 1	$R_c \uparrow$
Kwon2007	Ir, Pt AuPt Au-Pt, Au-Ir	<i>Hot switching</i> N/A / 100mA	x 100 x 5 x 10	$R_c \uparrow$
Ke2008	Ru	<i>Hot switching (?)</i> N/A 1.6/5/10 mA	x 4 x 13 x 15	$R_c \uparrow$
Yang2009	AuNi7.8 AuNi12.8 AuNi20	<i>Hot switching</i> 1V / 1mA	x 4 x 7 x 12	Erosion

Tableau 17. Analyse bibliographique des matériaux de contact testés en remplacement de l'or et résultats obtenus.

Comme nous le remarquons, l'utilisation d'or durci ou de matériaux du groupe platine permet d'obtenir, en règle générale, une durée de vie plus élevée. Ce résultat est toutefois à prendre avec précaution car dans toutes les publications citées la reproductibilité des résultats fournis est rarement vérifiée, alors que nous avons vu lors de l'étude de notre micro-interrupteur que pour un même lot de composants des comportements très différents pouvaient être obtenus.

Le problème de l'utilisation de matériaux du groupe platine est l'augmentation de la résistance de contact au cours du cyclage. Nous remarquons qu'effectivement tous les modes de défaillance rapportés lors de l'utilisation de tels matériaux se traduisent par une augmentation de la résistance. Chen et al. ont ainsi montré que plus le pourcentage de Rh, Pt ou Ru était important dans leur alliage d'or, plus la résistance de contact augmentait rapidement lors de leurs cyclages mécaniques. Seuls des alliages à faible pourcentage de Ru ou de Pt permettaient d'éviter cette augmentation de résistance engendrée par l'apparition de polymères de friction.

Le problème des matériaux du groupe platine est en effet leur propension à former des polymères de friction, phénomène que nous avons mis en évidence sur notre micro-interrupteur aussi. Pour des raisons techniques, nous souhaitons utiliser des matériaux de contact purs dans notre micro-interrupteur, le recours à des alliages d'or nickel ou d'or ruthénium n'est donc pas la solution que nous retenons pour l'instant. Le challenge consiste à trouver un matériau qui présente les mêmes avantages que les matériaux du groupe platine (dureté et température de fusion élevées) sans l'inconvénient de la formation des polymères de friction. C'est pour cette raison que notre choix s'est porté vers le tungstène.

Le tungstène possède une température de fusion extrêmement élevée et une dureté comparable à celle des matériaux du groupe platine. De plus il est connu pour être catalytiquement inactif [Hermance1958] et donc ne pas former de polymères de friction. C'est de plus un matériau standard de la microélectronique, son intégration dans un micro-interrupteur ne poserait donc pas de problème. Ses principaux inconvénients sont sa facilité à s'oxyder même à température ambiante et sa résistivité élevée.

Le problème de l'oxydation peut être résolu dans notre cas grâce au procédé de packaging durant lequel une étape de désoxydation à l'acide formique est réalisée. De plus, une fois le dispositif packagé, l'atmosphère de fonctionnement est inerte et nous pouvons donc espérer que le matériau ne s'oxydera pas. Malgré tout il est possible que la résistance de contact initiale soit élevée, mais dans les applications auxquelles est destiné le micro-interrupteur, le critère le plus important est la stabilité de la résistance. Une résistance élevée mais stable peut donc être acceptable.

Ces considérations nous ont poussés à évaluer le tungstène comme nouveau matériau de contact pour le micro-interrupteur. Pour cela, un dépôt de 500nm d'épaisseur de tungstène a été réalisé par pulvérisation sur des wafers de silicium préalablement oxydés. De la même manière que pour les tests précédents, les wafers ont ensuite été clivés en carrés de quelques millimètres de côté. Ces échantillons sont ensuite collés sur des lamelles reed pour être utilisés dans le banc de test. Le contact mobile est une pointe en tungstène massif possédant un rayon de courbure de 7 μ m.

5.1. Mesure de la résistance de contact en fonction de la force

Nous avons procédé à des mesures de résistance de ce micro-contact en tungstène grâce à notre banc de test. La lamelle reed est amenée progressivement en contact avec l'aiguille grâce à l'actionneur piézoélectrique. Durant cette mise en contact progressive la force de contact est mesurée à l'aide du capteur de force et la résistance de contact en utilisant un courant de 1mA. Le comportement du contact en fonction de la force appliquée est alors présenté sur la Figure 88.

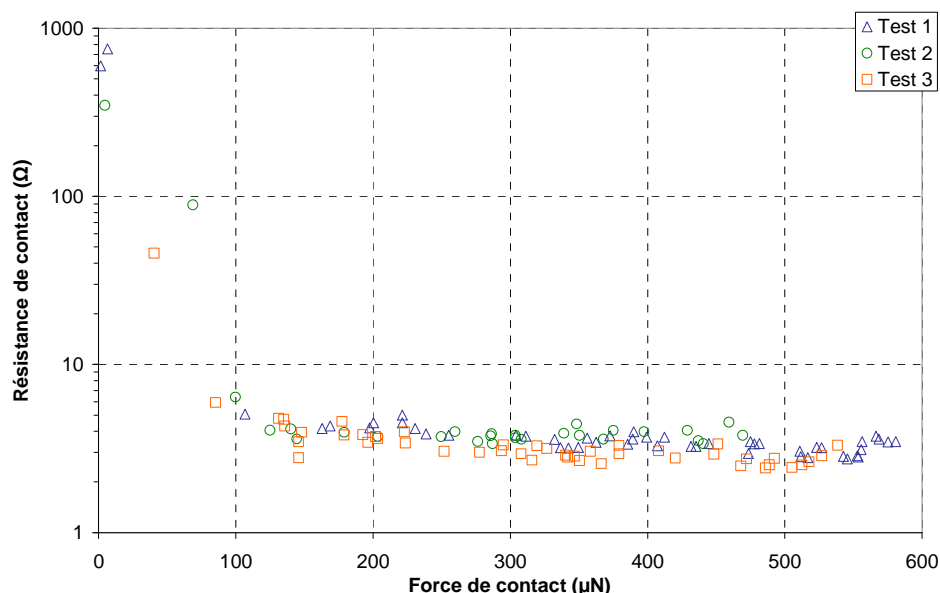


Figure 88. Evolution de la résistance de contact en fonction de la force appliquée. Contact W-W.

Nous remarquons que la résistance de contact atteint une valeur de 3-4 Ω lorsqu'une force de contact de 200 μN est appliquée. Un contact stable est obtenu dès 150 μN de force de contact. Une tentative de modélisation de la résistance de contact grâce aux modèles utilisés précédemment sous-estime largement la résistance de contact. La présence d'une couche d'oxyde de tungstène est donc plus que probable et un modèle de résistance de contact prenant en compte un film d'interface serait donc approprié. Cependant la résistance de quelques ohms que nous mesurons est acceptable pour les applications que nous visons. Il s'agit maintenant de savoir comment cette résistance évolue lors de tests d'endurance.

5.2. Tests d'endurance

Deux types de tests d'endurance ont été menés, dans le but d'évaluer la performance du tungstène. Une première série de deux tests a consisté à réaliser un cyclage purement mécanique, sans tension appliquée aux bornes du contact. Deux millions de cycles ont été réalisés en maintenant une force de contact de $300 \mu\text{N} \pm 50 \mu\text{N}$. La résistance de contact a été mesurée initialement et elle est de quelques ohms. A l'issue de ces tests d'endurance elle atteint plusieurs centaines d'ohms et une analyse MEB de la zone de contact révèle la présence d'une couche isolante (cf. Figure 89).

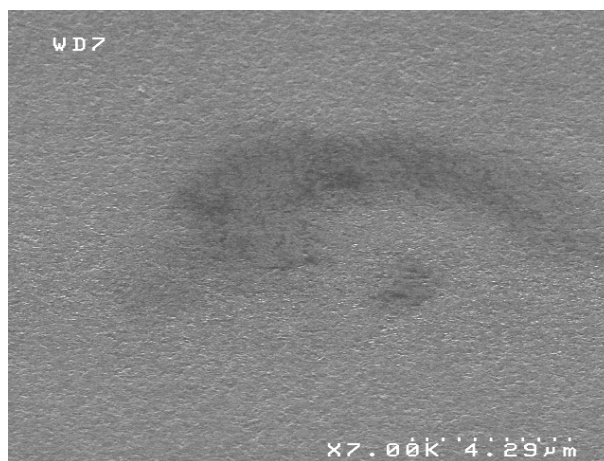


Figure 89. Contact mobile en tungstène à l'issue d'un test d'endurance mécanique. Apparition probable d'oxyde.

Aucune analyse physico-chimique complémentaire n'a pu être effectuée¹⁶, mais cette couche isolante est très probablement de l'oxyde de tungstène. Malgré le fait que les tests soient effectués sous azote, de l'oxygène peut rester dans l'enceinte (le vide initial avant introduction de l'azote est de l'ordre de 10^{-1} - 10^{-2} mbar seulement). Dans les relais macroscopiques, le tungstène est utilisé dans certains cas [Johler2001], mais une couche d'or de quelques microns est déposée par-dessus pour éviter son oxydation lors de l'utilisation à des calibres faibles. Si le contact est utilisé à calibre plus élevé, l'or est érodé et le contact se fait alors sur le tungstène mais jamais aucun polymère de friction n'a été mis en évidence sur le tungstène. Le contrôle de l'atmosphère est donc primordial si nous souhaitons utiliser le tungstène comme matériau de contact pour le micro-interrupteur.

Des tests ont ensuite été réalisés à 10Hz, en *hot switching* 5V/1mA. Durant ces tests, les deux polarités ont été testées : une série de deux tests a été effectuée avec la pointe polarisée positivement (polarité 1) et une autre série avec la pointe polarisée négativement (polarité 2). Cinq millions de cycles ont été effectués dans la polarité 1 sans que la résistance de contact ne devienne supérieure à 500Ω. Par contre, dans la polarité 2, dès 15000 cycles la résistance atteint des valeurs inacceptables (cf. Figure 90).

¹⁶ La zone de contact est minuscule par rapport à l'étendue totale de la pastille de contact, il nous est donc impossible de retrouver aisément cette trace oxydée (le MEB que nous utilisons pour réaliser nos clichés ne possède pas d'analyse EDX intégrée malheureusement).

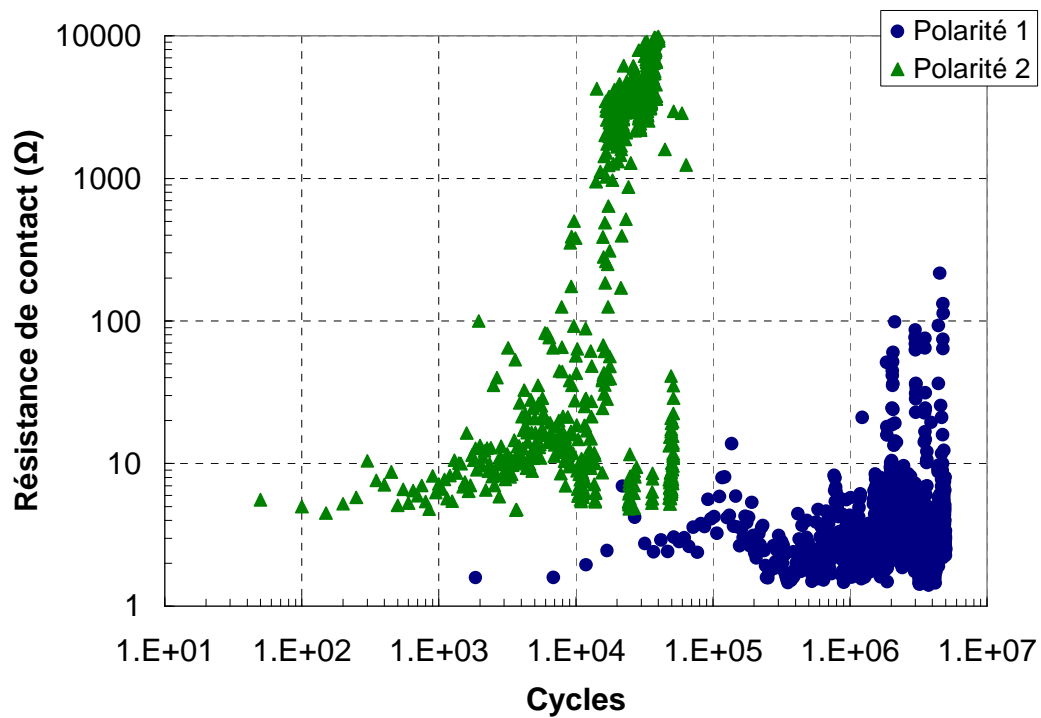
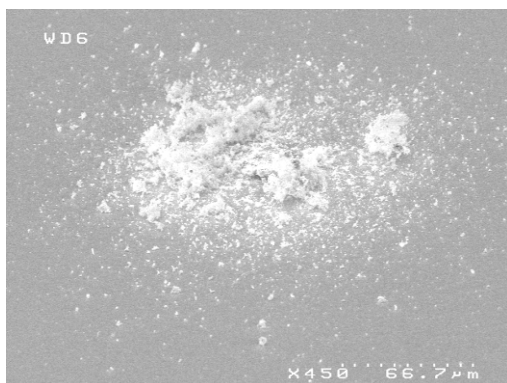


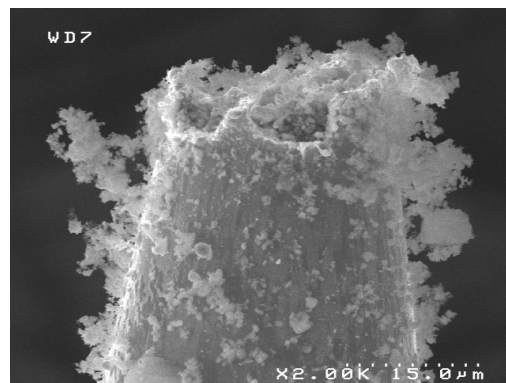
Figure 90. Evolution typique de la résistance de contact en fonction du nombre de cycles dans les deux polarités de test. Contact W-W.

Les observations MEB des contacts à l'issue de ces tests révèlent un net transfert de matière dirigé de l'anode vers la cathode (cf. Figure 91). Dans le cas de la polarité 1 l'aiguille a été érodée de façon spectaculaire (Figure 91 – b) et la matière s'est en partie déposée sur le contact opposé (Figure 91 – a). Dans le cas de l'autre polarité, la couche de 500nm de tungstène a été rapidement érodée (Figure 91 – c) jusqu'à atteindre la sous-couche de SiO_2 , expliquant l'augmentation de résistance constatée.

Polarité 1

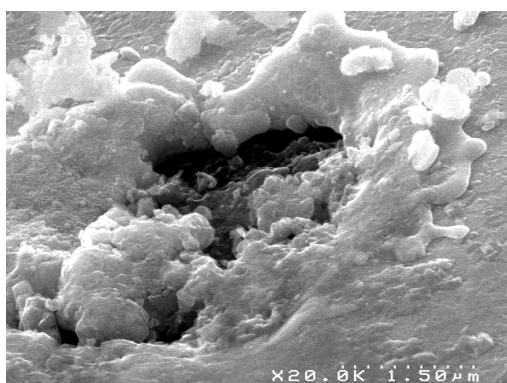


(a) Contact mobile, cathode

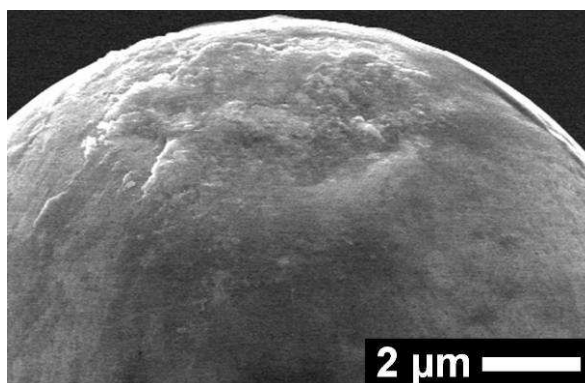


(b) Contact fixe, anode

Polarité 2



(c) Contact mobile, anode



(d) Contact fixe, cathode

Figure 91. Observations MEB des contacts en tungstène à l'issue des tests d'endurance en hot switching 5V/1mA.

Ces tests sur le tungstène nous permettent de conclure très partiellement que le tungstène peut être intéressant pour des applications dans les micro-contacts. Des tests complémentaires seraient nécessaires. Le point positif est qu'aucun polymère de friction n'a été observé sur les contacts, ce qui est un avantage par rapport au ruthénium. Cependant l'apparition d'un oxyde de tungstène isolant laisse présager qu'un contrôle très strict de l'atmosphère de test serait nécessaire. L'érosion observée lors des tests de *hot switching* semble bien plus importante que sur les autres matériaux testés, point qui demanderait à être confirmé par des tests comparatifs effectués dans des conditions exactement similaires.

6. Conclusions et perspectives

Nous avons développé un banc de test original, qui se différencie des équipements habituellement utilisés pour l'étude de micro-contacts sur au moins trois points :

- (1) La fréquence maximale de cyclage est bien supérieure aux quelques hertz habituellement constatés ;
- (2) Sa compacité lui permet de loger aisément dans une enceinte hermétique permettant une étude précise de l'influence de l'atmosphère de test sur les performances du contact ;

-
- (3) Sa simplicité de mise en œuvre, grâce à l'utilisation de véhicules de test disponibles commercialement et peu coûteux ;
 - (4) Son prix, qui n'est pas un critère scientifique certes, mais qui est dix fois inférieur à un équipement classique type nanoindenteur ou AFM.

Ce banc de test a été intégralement imaginé, conçu fabriqué et qualifié durant ce travail de thèse, et nous avons montré qu'il était capable de reproduire certains modes de défaillance observés sur les micro-interrupteurs.

Nous avons ensuite utilisé ce banc pour évaluer l'intérêt du tungstène en vue d'une utilisation dans notre micro-interrupteur. La totalité des tests qui auraient été nécessaires pour conclure n'ont pas pu être réalisés, faute de temps. Cependant l'intérêt du banc pour une telle application est évident et permettrait de gagner un temps précieux en évitant l'intégration directe de nouveaux matériaux dans la filière de fabrication du micro-interrupteur.

Les tests menés sur l'or ont cependant mis en évidence le point faible de cette approche. La durée de vie d'un micro-contact est grandement liée à l'état de surface des matériaux, et dans notre cas l'utilisation de pointes de test contaminées nous a empêchés d'évaluer l'endurance de l'or en *hot switching*. Il est alors judicieux de se demander si une comparaison de durée de vie entre différents matériaux sera représentative du comportement une fois le matériau intégré dans un dispositif MEMS.

L'état de surface des contacts en sortie de fabrication est difficilement contrôlable, et il se peut alors qu'un matériau présentant une durée de vie accrue sur le banc de test se comporte tout à fait différemment une fois intégré dans le micro-interrupteur. A simple titre d'exemple, un lot de micro-interrupteurs a été fabriqué avec des contacts en tungstène et leur résistance de contact a été mesurée en fin de fabrication sur un wafer complet. Les résistances sont toutes comprises entre 10 et 50 Ω avec une moyenne aux alentours de 20 Ω . Or nous avons vu que sur notre banc de test la résistance initiale de nos contacts en tungstène était de quelques ohms. Le procédé de fabrication joue donc un rôle non négligeable, et pour que les essais soient représentatifs il faudrait que les matériaux aient subi les mêmes étapes de procédé que le micro-interrupteur complet avant d'être testés dans le banc de test.

Nous pouvons alors émettre l'idée que le principal intérêt de ce banc ne réside finalement pas dans la comparaison de différents matériaux, mais dans la comparaison de différents procédés de nettoyage. En effet, si le banc est utilisé pour tester un même matériau ayant subi différents traitements de surface (nettoyage, greffages de couches de protection...), et que nous sommes capables de réaliser ensuite les mêmes traitements de surface en fin de fabrication (juste avant le packaging), l'intérêt du banc est évident. De même, il peut permettre l'étude comparative de l'influence de différentes atmosphères sur l'endurance d'un matériau de contact.

Chapitre 4

Emission électronique et transfert de matière à l'échelle nanométrique

Les chapitres précédents ont permis de mettre en évidence des transferts de matière entre les deux électrodes du contact électrique lors de tests d'endurance avec interruption de courant (*hot switching*). Ces transferts de matière sont toujours dirigés de l'anode vers la cathode et dans le cas des tests sous 14V/10mA, ils sont la cause principale de défaillance du micro-interrupteur, entraînant un collage permanent des deux membres du contact. Dans le cas des tests sous 5V/1mA et 3V/10μA, les volumes de matériau transférés sont moins importants mais s'accompagnent souvent de l'apparition d'une couche carbonée très peu conductrice.

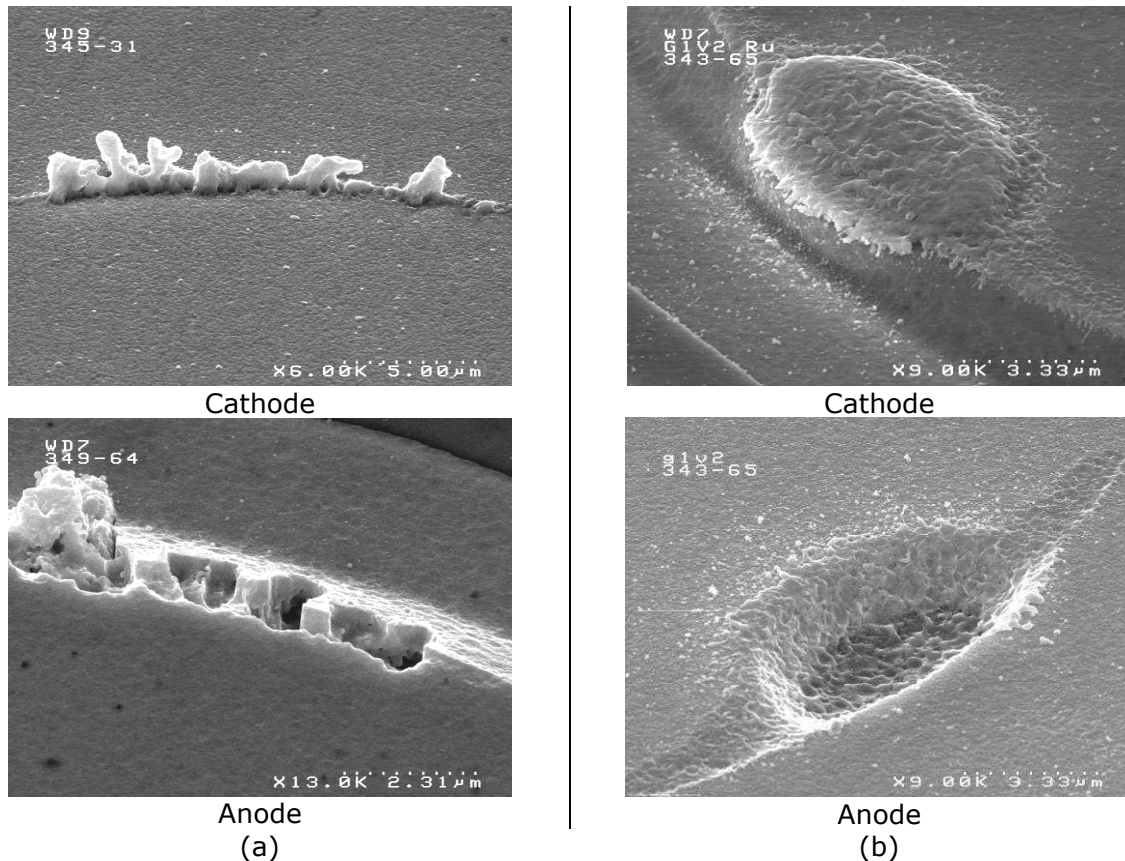


Figure 92. Mise en évidence de transferts de matière sur le micro-interrupteur. Observation MEB des contacts (a) après 10^6 cycles sous 5V/1mA. (b) après 10^4 cycles sous 14V/10mA.

Comme nous le verrons dans la première partie de ce chapitre l'origine du phénomène de transfert de matière reste jusqu'à maintenant controversée. Pour comprendre ce phénomène un banc de test permettant de simuler l'actionnement d'un micro-contact à des vitesses ultra-réduites (quelques nanomètres par seconde) a été développé. Il fera l'objet de la seconde partie de ce chapitre. La suite du chapitre présentera les résultats obtenus à l'aide de ce banc de test et l'analyse des phénomènes physiques mis en jeu lors de l'établissement et l'interruption du courant à ces échelles nanométriques.

1. Etat de l'art

Il est possible de trouver dans la littérature sur les micro-interrupteurs plusieurs cas de transferts de matière, obtenus dans des conditions courant/tension très similaires aux

calibres que nous avons testés [Sakata1999, Schlaak2002, Kwon2007, Newman2008, Yang2008]. L'explication de ces transferts de matière est cependant toujours vague et aucune publication ne va plus loin que la simple formulation d'hypothèse. L'origine physique principalement avancée est celle du micro-arc [Kruglick1999, Schlaak2002, Dickrell2007]. Seul Z. Yang se penche sur le problème et essaie de comprendre le phénomène [Yang2008]. Ses tests d'endurance, réalisés sur un AFM modifié, mettent en évidence des transferts de matière toujours orientés de l'anode vers la cathode (cf. Figure 93), comme dans notre cas. Lorsque le même test est réalisé en courant alternatif, ces transferts de matière deviennent quasiment négligeables.

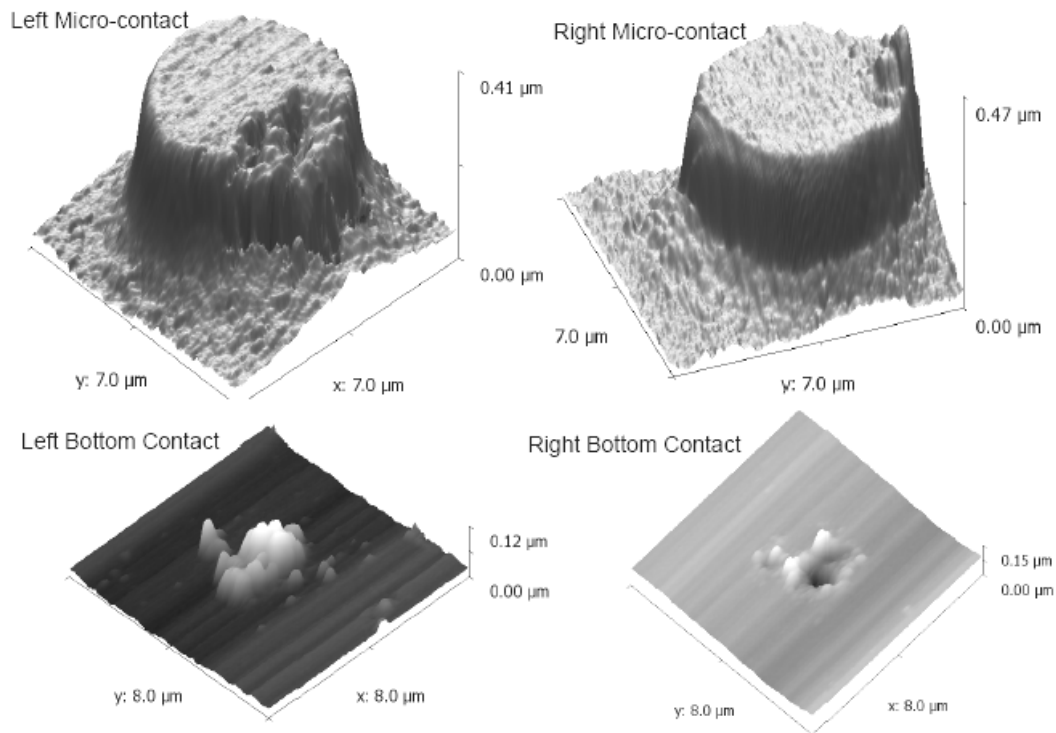


Figure 93. Observation AFM de transferts de matière par Z. Yang sur un micro-contact MEMS. [Yang2008]

L'auteur examine alors les différents mécanismes envisageables pour expliquer un tel phénomène, et conclut que ces transferts de matière sont engendrés par l'évaporation et l'ionisation du matériau de l'anode sous l'effet du champ électrique local intense (*field evaporation* [Tsong1991]). Nous allons voir qu'effectivement aucun des phénomènes classiques de transfert de matière n'est applicable dans notre cas, mais que l'explication avancée par Z. Yang n'est pas totalement satisfaisante. Le matériau de l'anode s'évapore, certes, mais l'origine de cette évaporation est à chercher du côté de la cathode et la physique liée est celle de la coupure du courant dans le vide.

Commençons donc par une analyse des phénomènes physiques pouvant engendrer de tels transferts de matière. Quatre phénomènes peuvent être identifiés : l'évaporation sous champ dont nous venons de parler, l'électromigration, le « transfert fin » par pont fondu et l'arc électrique.

1.1. L'évaporation sous champ (*field evaporation*)

Ce phénomène, découvert en 1941 par E.W. Müller [Müller1941], est l'arrachement d'un atome surfacique sous forme d'ion lors de l'application d'un champ local très intense (~ 52 V/nm pour l'or [Zurlev2003]). Ce phénomène est à l'origine du développement de la sonde atomique tomographique (ou microscopie ionique) [Tsong1990, Müller1966]. Ce mode de transfert pourrait correspondre à nos observations, les atomes étant arrachés sous forme ionique, un transfert de matière dépendant du sens du champ concorderait. Cependant comme nous pouvons le remarquer, avec les calibres de tests utilisés ne dépassant pas les quelques volts (tout comme Z. Yang), obtenir un champ de 52 V/nm n'est possible que si l'espacement inter-électrodes est de 0.1 nm! Autant dire que les conditions pour que ce phénomène d'évaporation sous champ se produise ne sont jamais remplies, ou alors durant des temps quasi-nuls.

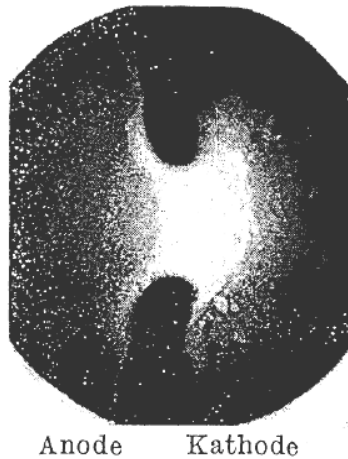
1.2. L'électromigration

L'électromigration, quant à elle, peut être définie comme le déplacement d'atomes dans un conducteur induit par un flux d'électrons ; phénomène se produisant lorsque des densités de courant supérieures ou égales à 10^5 A/cm² sont mises en jeu. L'électromigration est la cause principale de défaillance dans les interconnexions en microélectronique : des atomes peuvent être déplacés jusqu'à engendrer des trous dans les lignes métalliques.

Des tests d'électromigration ont été effectués sur le micro-interrupteur Schneider/Leti. Le composant a été maintenu à l'état fermé pendant six mois, avec 1mA circulant en permanence dans les contacts. De telles conditions engendrent des densités de courant susceptibles d'entraîner de l'électromigration, nous l'avons vu dans le chapitre 2. Cependant absolument aucune défaillance n'a été constatée. De plus, si l'électromigration était à l'origine des transferts de matière, des tests d'endurance avec passage de courant uniquement à l'état fermé (*cold switching*) devraient se révéler aussi sévères que des tests d'endurance avec interruption de courant (*hot switching*). Les différences plus que notables de durée de vie relevées dans la bibliographie entre ces deux types de tests [Lampen2004, Kim2008] révèlent que l'électromigration n'est surement pas le phénomène prépondérant ; un phénomène lié à l'interruption et/ou l'établissement du courant est la cause principale des transferts de matière observés.

1.3. Le transfert fin

Le transfert fin (*fine transfer* ou *bridge transfer*) est une théorie développée dans les années 1950 par Holm et ses confrères [Holm1967]. Si une fonte localisée du matériau a lieu pendant que le contact est fermé, son ouverture engendre un étirement de ce métal fondu : le pont fondu. Lors de la séparation des zones en contact, le pont fondu s'étire et sa section diminue jusqu'à arriver à sa rupture ; rupture qui se produit à la valeur de tension d'ébullition du métal. Des ponts fondus ont été mis en évidence dès le début du 20^{ème} siècle et les observations révèlent que la distribution des températures dans un pont fondu est asymétrique, la cathode étant la zone la plus chaude dans le cas d'électrodes en platine (cf. Figure 94).



*Figure 94. Photographie d'un pont fondu stabilisé entre deux électrodes en platine.
[Dietrich1948]*

Holm en déduit que lorsque ce pont fondu se rompt, sa rupture se fait de façon asymétrique et génère donc un transfert de matière directionnel, de la zone la plus chaude vers la zone la plus froide, donc de la cathode vers l'anode. Il a alors été admis que ce mode de transfert, qualifié de « transfert fin », était à l'origine des transferts de matière observés dans les contacts opérant en dehors des conditions d'arc électrique.

Or il se trouve que les tensions et courants auxquels opèrent les micro-interrupteurs sont trop faibles pour être en condition d'arc électrique, et ce mode de transfert pourrait s'appliquer. Malheureusement cette théorie de transfert fin a été remise en cause depuis qu'il a été mis en évidence que des arcs électrique instables (micro-arcs) pouvaient apparaître même en dehors des conditions d'arc [Slade1999, Rieder2000]. De surcroît, si ce transfert fin était à l'origine des transferts de matière observés, le sens de transfert serait inversé par rapport à nos résultats: cathode vers anode.

1.4. L'arc électrique

L'arc électrique peut être défini comme le passage d'un courant à travers un milieu isolant. Ce passage de courant n'est possible que si le milieu devient localement conducteur, donc s'il est ionisé : on parle alors de plasma. Le rôle d'un commutateur, comme son nom l'indique, est d'établir et d'interrompre le courant. Un arc électrique peut alors apparaître entre les électrodes lors de l'ouverture ou lors de la fermeture du contact, sous certaines conditions comme nous allons le voir par la suite. Les mécanismes mis en jeu dans ces deux phases sont différents et nous allons donc les analyser séparément. Pour simplifier, nous considérerons toujours qu'aucune inductance parasite n'est présente dans notre circuit de test. Cette hypothèse n'est pas abusive, le plus grand soin a toujours été apporté pour éviter ce genre de désagrément¹⁷.

¹⁷ La présence d'une inductance parasite dans le circuit de test peut engendrer, lors de l'ouverture du contact, des surtensions allant bien au dessus de la tension de test utilisée. Dans notre cas, une inductance parasite de 130nH est constatée, liée probablement au câblage.

1.4.1. Arc à l'ouverture

Commençons par la phase d'ouverture du contact, la plus propice à la formation d'un arc électrique, qui est présentée sur la Figure 95 et très bien décrite dans [Rieder2000]. L'ouverture d'un contact sous courant est caractérisée par l'apparition d'un pont fondu entre les deux électrodes du contact. Lorsque le contact s'ouvre le pont fondu est étiré jusqu'à se rompre mécaniquement ou exploser sous l'effet de la chaleur. Lors de cette explosion, du métal en fusion est projeté sous forme de gouttelettes et une partie du matériau est évaporé au travers du faible espacement présent alors entre les deux contacts ($< 1 \mu\text{m}$). La combinaison du faible gap avec la pression de vapeur métallique élevée engendre un champ local très intense et l'émission thermoélectronique d'électrons depuis la cathode. Ces électrons viennent alors ioniser les vapeurs métalliques présentes dans l'espace inter-électrodes. Cette ionisation a pour effet d'augmenter encore le champ électrique local et en 2 nanosecondes le milieu devient conducteur, c'est la première phase de l'arc électrique : l'arc métallique. Lorsque les deux membres du contact continuent de s'éloigner le gaz environnant pénètre dans l'espace inter-électrodes et vient interagir avec l'arc métallique (espacement $> 10 \mu\text{m}$). Les particules de gaz sont alors ionisées et c'est ce plasma qui va maintenant conduire le courant au travers du contact, il s'agit de la seconde phase de l'arc : l'arc gazeux. Cette phase de l'arc est la plus remarquable et est utilisée comme définition de l'arc électrique, même si comme nous venons de le voir il existe une autre forme d'arc électrique la précédant. Pour que cette phase ait lieu, la tension et le courant doivent être au moins égaux à des valeurs U_{\min} et I_{\min} (12,5V et 350mA pour l'or [Slade1999]).

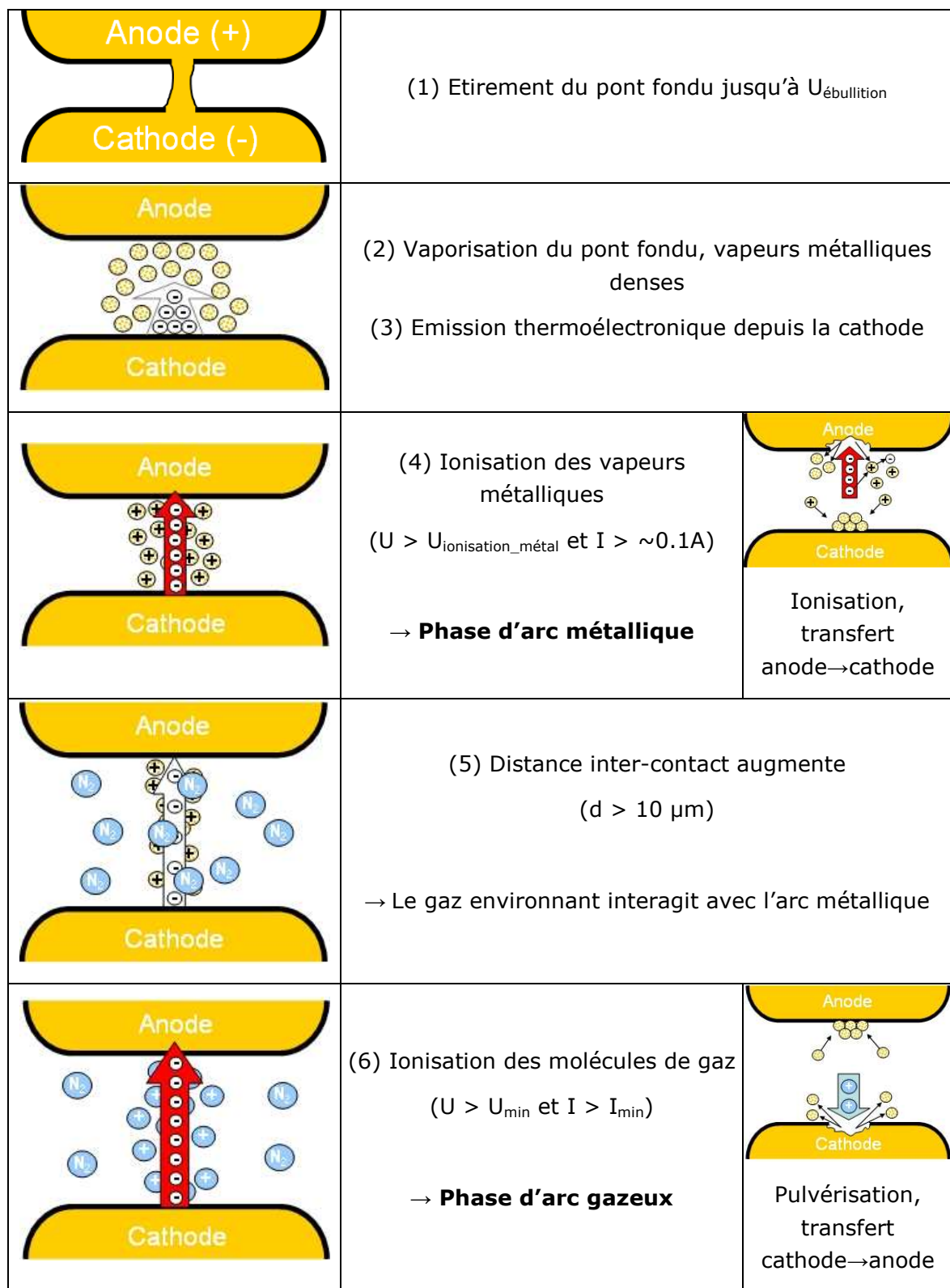


Figure 95. Les différentes étapes de l'apparition d'un arc électrique lors de l'ouverture de contacts sous courant.

Comme explicité précédemment, il existe une phase d'arc électrique instable et de courte durée, l'arc métallique, qui peut se produire même si les conditions d'arc (U_{min} et I_{min}) ne sont pas remplies. Cette forme d'arc électrique est couramment appelée « micro-arc » et est susceptible de se produire dans notre cas, étant donné que nous sommes en dehors

des conditions d'arc gazeux (12.5 V et 350mA pour l'or). De plus, cet arc métallique engendre un transfert de matière anode vers cathode, identique à celui observé lors des essais effectués sur le micro-interrupteur. Cependant, pour qu'un tel phénomène se produise, il est aisé de comprendre que la tension doit être au moins égale à la tension d'ionisation des atomes métalliques (9.22 V pour l'or). Dans le cas des tests sous 14V/10mA un tel arc pourrait donc se produire, mais est exclu à 5V/1mA. La partie suivante de ce chapitre permettra de tester cette hypothèse.

1.4.2. Arc à la fermeture

Lorsqu'un contact est ouvert, le courant ne circule pas, le gaz présent entre les deux électrodes jouant le rôle d'un isolant. Or, comme tout diélectrique, un gaz possède une tension de claquage, tension à partir de laquelle le gaz va s'ioniser et devenir conducteur. Ce phénomène d'ionisation est un phénomène d'avalanche, le premier électron libéré par la cathode sous l'effet du champ inter-électrode intense ionise une molécule de gaz qui va donc libérer un électron. Ce nouvel électron est accéléré par le champ et va à son tour ioniser une autre molécule de gaz, et ainsi de suite jusqu'à ionisation totale du milieu diélectrique. Ce type de phénomène est appelée décharge de Townsend et nous pouvons aisément remarquer que le résultat final est identique à l'arc gazeux présenté précédemment.

La tenue diélectrique d'un gaz dépend de l'espacement entre les deux électrodes, mais aussi de la pression du gaz. Ce comportement est régi par la loi de Paschen, énoncée en 1889 et qui permet de relier la tension de claquage des gaz au produit de la pression par la distance inter-électrodes ($p \cdot d$). La Figure 96 est une représentation de cette loi dans l'air et présente un minimum aux alentours de 330V, appelé minimum de Paschen.

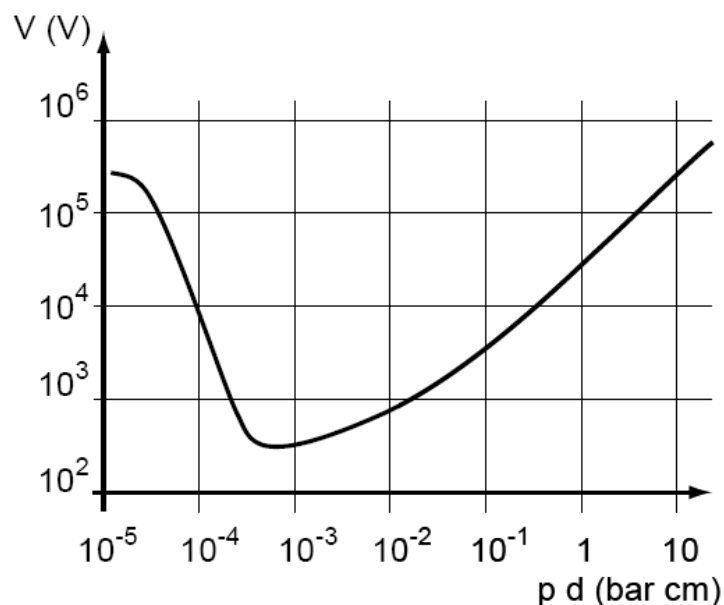


Figure 96. Evolution de la rigidité diélectrique de l'air en fonction du produit pression*distance inter-électrodes (courbe de Paschen). [Picot2000]

Lorsque la pression diminue, le libre parcours moyen des électrons augmente et ceux-ci accumulent de l'énergie cinétique entre deux collisions avec les molécules de gaz. Le

claquage du gaz est ainsi facilité, ce qui justifie la diminution de la tension de claquage avec la pression. Cependant, si la pression devient trop faible, les collisions entre les électrons et les molécules de gaz se réduisent et ne peuvent donc pas engendrer un phénomène d'avalanche. La tension de claquage passe alors par un minimum et augmente si la pression continue à diminuer. La tenue diélectrique s'améliore alors rapidement aux basses pressions jusqu'à atteindre un palier $p \cdot d$ aux alentours de 10^{-5} bar.cm. C'est ce palier qui caractérise le comportement diélectrique dans les disjoncteurs et interrupteurs sous vide (pression inférieure à 10^{-3} mbar, distance inter-électrodes de l'ordre de 1 à 10 cm).

Dans cette zone, la tenue diélectrique n'est plus régie par le phénomène d'ionisation du gaz, mais par des phénomènes d'émission électronique par effet de champ. La tenue diélectrique dépend alors de l'état de surface des électrodes, et varie linéairement avec la distance inter-électrodes (cf. Figure 97). La tension de claquage (en volts) est alors directement proportionnelle à la distance inter-électrodes suivant une loi de type

$V_{\text{claquage}} = K \cdot d$, avec d la distance inter-électrodes en μm et K une constante égale à $97 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, comme représenté sur la figure 6 pour des distances inter-électrodes inférieures à $200 \mu\text{m}$ [Slade2002].

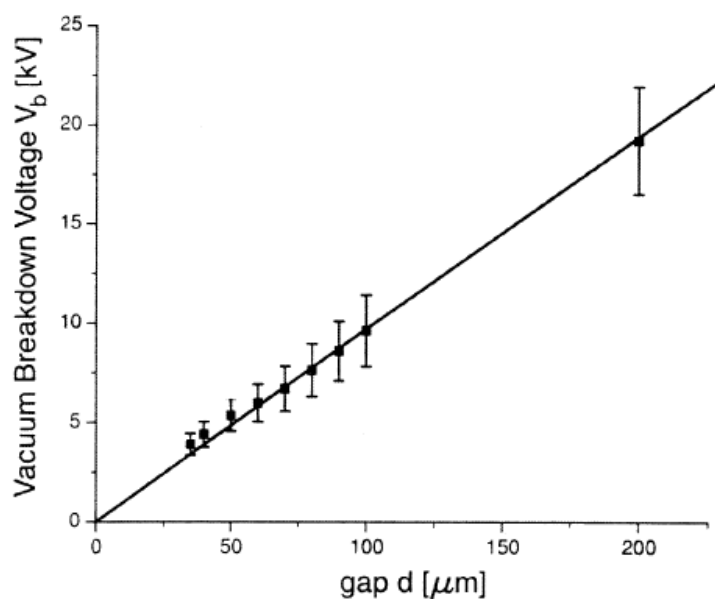


Figure 97. Tension de claquage en fonction de l'espacement inter-électrodes pour des distances inférieures à $200 \mu\text{m}$ dans le vide. [Slade2002]

Les micro-interrupteurs opèrent en général sous une pression proche de la pression atmosphérique, sous air ou sous azote et non pas sous vide. C'est le cas du micro-interrupteur étudié dont le capot est scellé sous 0,5 bar d'azote. La distance inter-électrodes est très faible dans un tel dispositif (quelques micromètres à l'état ouvert), et la loi de Paschen nous incite à penser qu'il est donc impossible qu'il se développe une décharge entre les deux électrodes du contact avec les faibles tensions utilisées ($p \cdot d \approx 10^{-4}$ bar.cm donc $V_{\text{claquage}} = 10 \text{ kV}$!).

A ces faibles distances (distance inter-contacts $< 5 \mu\text{m}$), il a été montré durant les dix dernières années que la loi de Paschen n'est plus valable [Torres1999, Hirata2000,

Lee2001, Slade2002, Wallash2003]. Cette loi illustre, en effet, le claquage des gaz par avalanche de Townsend. Or dans des espacements inter-contacts si réduits, peu de molécules de gaz sont présentes et surtout le libre parcours moyen des électrons dans l'air est d'environ $0.5\mu\text{m}$ à pression atmosphérique. Ceci implique que si la distance inter-électrodes est de quelques microns, les électrons interagissent peu avec le peu de gaz environnant. Les conditions dans une telle situation sont donc très proches de celle d'un commutateur sous vide et il a effectivement été montré que pour des distances inter-électrodes inférieures à $4\text{--}5\mu\text{m}$ un claquage diélectrique pouvait se produire mais que son comportement se rapprochait de celui d'un claquage dans le vide [Slade2002]. Le minimum de Paschen n'a donc plus aucun sens à ces faibles distances. L'adaptation de la courbe de Paschen est alors présentée sur la Figure 98. La pente de la droite régissant le claquage pour les faibles distances est d'environ $75\text{ V}/\mu\text{m}$ [Lee2001, Wallash2003, Slade2002] mais très dépendante de l'état de surfaces et de la géométrie des électrodes.

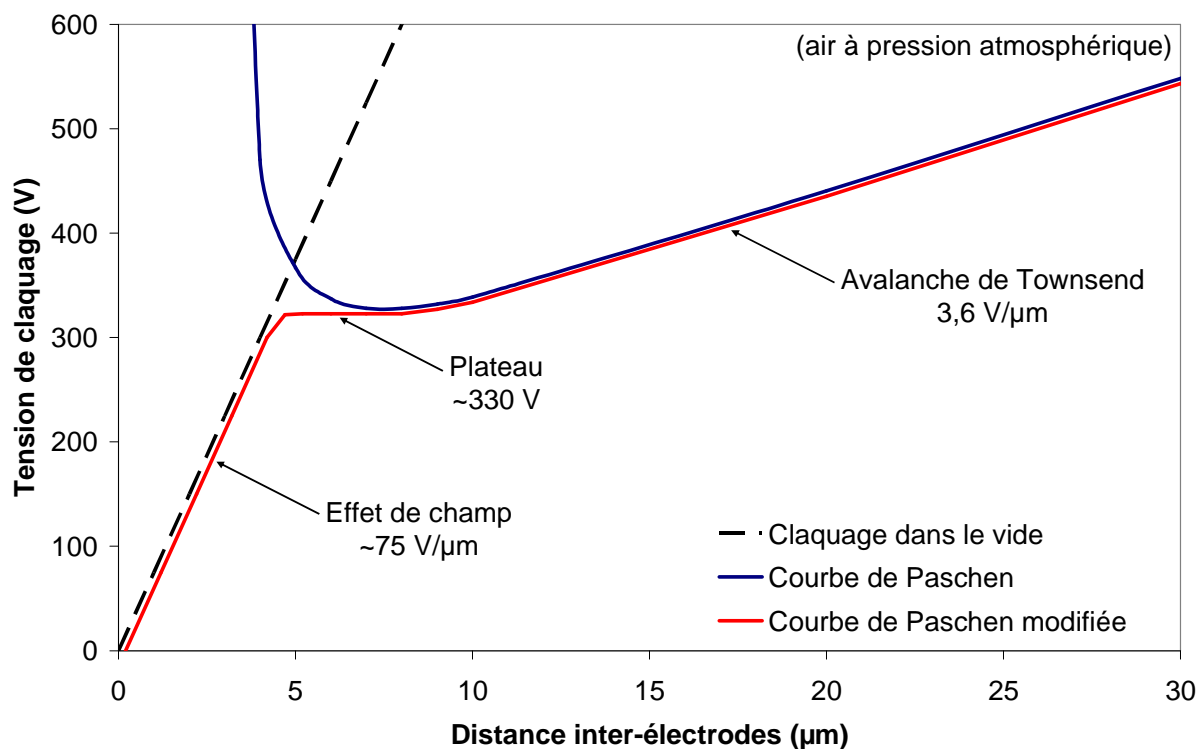


Figure 98. Adaptation de la Loi de Paschen à des distances inter-électrodes micrométriques, pour une pression constante (P_{atm}).

Ces observations suggèrent qu'un claquage diélectrique peut avoir lieu lors de la commutation du micro-interrupteur. Toutefois, si nous examinons avec précision toutes les études réalisées sur ce sujet, nous nous apercevons que les valeurs des tensions minimales rapportées sont nettement plus élevées que celles auxquelles le micro-interrupteur a été testé. Sur la Figure 99 suivante nous avons rapporté les plus faibles valeurs de tension de claquage publiées.

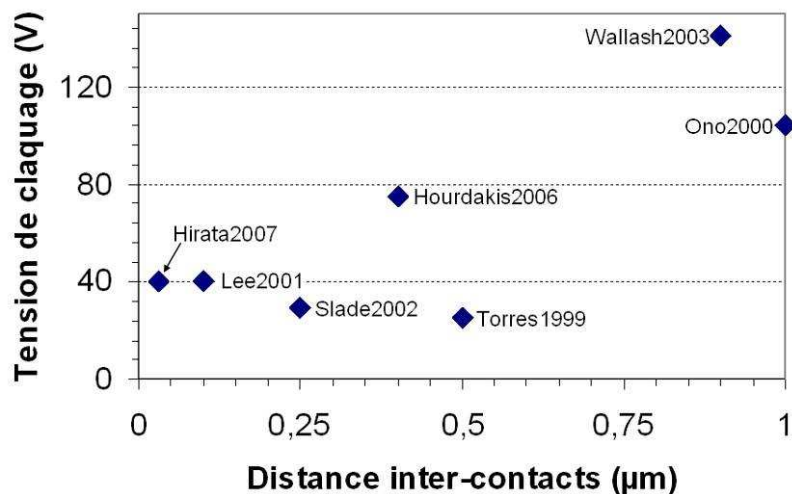


Figure 99. Tensions de claquage minimales publiées pour des distances inter-électrodes submicrométriques.

Les tensions minimales de claquage pour des distances inter-contacts inférieures au micron sont donc comprises entre 20-25 volts et une centaine de volts. Une extrapolation linéaire de ces données fournit une droite de pente $90 \text{ V}/\mu\text{m}$, cohérente avec les observations précédentes. Cependant nous constatons qu'aucune tension inférieure à 20 V n'a été rapportée, ceci ne peut donc pas expliquer avec certitude les dégradations observées sur le micro-interrupteur.

Ce tour d'horizon des phénomènes pouvant engendrer des transferts de matière tels que ceux observés sur le micro-interrupteur nous permet de tirer les conclusions suivantes.

- Pour les calibres 5V/1mA et 14V/10mA des claquages diélectriques lors de la fermeture du contact sont peut-être envisageables, mais des tensions si faibles n'ont jamais été rapportées jusqu'à maintenant.
- Pour le calibre 14V/10mA, la présence d'un arc métallique lors de l'ouverture du contact est envisageable aussi, la tension étant supérieure au seuil d'ionisation de l'or.

Pour vérifier ces hypothèses nous allons alors procéder dans un premier temps à des mesures précises à l'aide d'un oscilloscope pour déceler d'éventuels événements électriques lors des phases de commutation sous courant.

2. Mesures directes sur le micro-interrupteur

La présence d'un arc électrique entre deux contacts est caractérisée par l'apparition d'une tension d'arc, générée par la présence du plasma conducteur (colonne d'arc). A chaque stade de l'arc correspond un palier de tension caractéristique lié uniquement à la nature du matériau pour la phase métallique. La phase gazeuse de l'arc, par contre, est caractérisée par un maximum de deux paliers de tension, dont les valeurs dépendent du matériau de contact et du gaz environnant [Jemaa1986]. Pour des contacts en or, le palier caractéristique de la phase métallique est proche de la tension minimale d'arc (12,5V) tandis que les paliers de la phase gazeuse se situent aux alentours de 25-30 V. Ainsi, une observation à l'oscilloscope de la tension lors de l'actionnement du micro-

interrupteur nous permettra de détecter la présence d'un arc électrique, même dans sa simple phase métallique.

2.1. Montage expérimental

Dans le but d'observer la tension aux bornes du micro-interrupteur durant les phases d'établissement et d'interruption du courant, le montage expérimental présenté en Figure 100 a été réalisé.

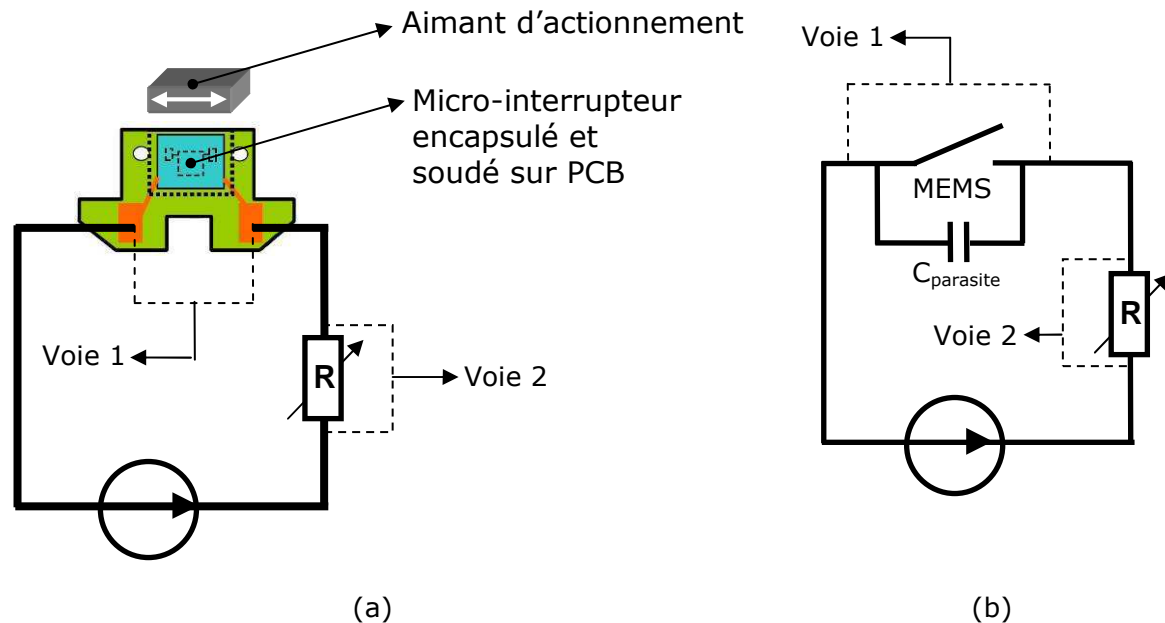


Figure 100. (a) Schéma du montage utilisé pour les mesures directes à l'oscilloscope. (b) Équivalent électrique incluant la capacité parasite liée au packaging du MEMS.

Le micro-interrupteur testé (simple contact en or) est actionné à l'aide d'un aimant en SmCo de $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$ placé à une distance d'un millimètre au dessus du composant. Cet aimant est déplacé à l'aide d'une platine de translation Newport MFA-CC. La membrane ferromagnétique mobile du micro-interrupteur tend toujours à s'aligner dans le sens des lignes du champ extérieur et ainsi au passage du plan médian de l'aimant la membrane bascule brusquement et le micro-interrupteur change d'état. Un générateur de tension Tti TSX3510 est utilisé pour alimenter le circuit en tension continue (5V et 14V), tandis que le courant est limité à l'aide d'une résistance variable placée en série avec le générateur. La tension aux bornes du micro-interrupteur et l'image du courant circulant dans la résistance de charge sont mesurées grâce à deux sondes différentielles LeCroy ADP305 (100 MHz) reliées à un oscilloscope LeCroy 64Xi (600 MHz).

2.2. Mesures en conditions d'arc

Dans le but de valider la mesure, les premiers tests sont effectués en conditions d'arc ($U > 12.5 \text{ V}$ et $I > 350 \text{ mA}$ pour des contacts en or). Le micro-interrupteur est alors testé en appliquant 12.5 V à ses bornes et en limitant le courant à 540 mA à l'aide d'une résistance (bobinée !) de 23Ω . La phase de fermeture du contact dans ces conditions pourtant propices à l'apparition d'un arc ne révèle cependant aucun arc électrique. La

phase d'ouverture du contact, par contre, a permis de mettre en évidence l'apparition d'un arc électrique et les oscillogrammes sont présentés sur la figure suivante.

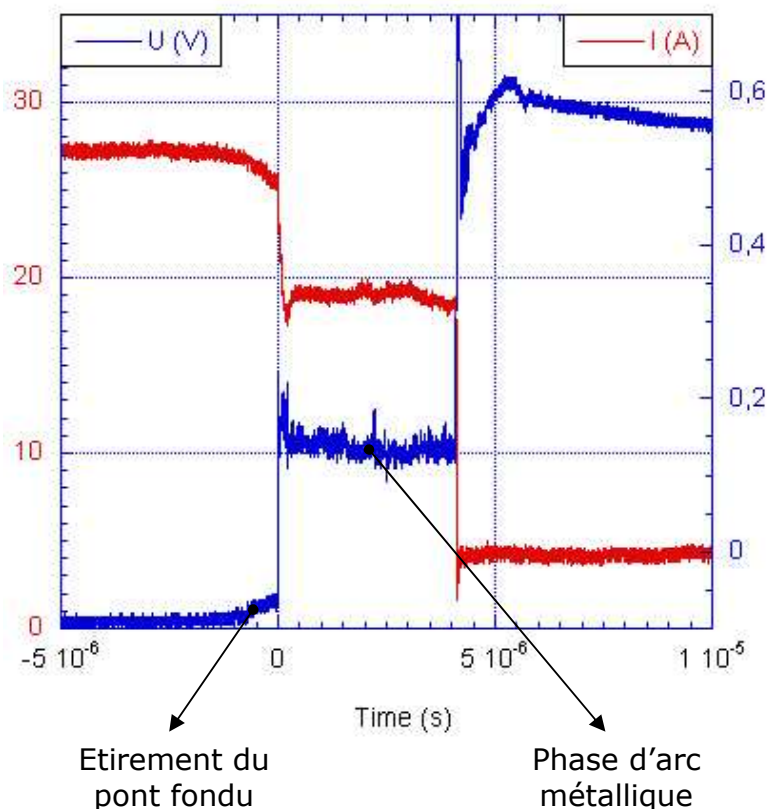


Figure 101. Mise en évidence d'un arc électrique en phase métallique lors de l'ouverture du micro-interrupteur sous 12.5V/540mA.

Ces oscillogrammes présentent deux phénomènes notables : l'étirement du pont fondu jusqu'à sa vaporisation et la phase d'arc métallique. Comme cela a été présenté dans la première partie de ce chapitre, l'ouverture sous courant d'un contact génère un pont fondu qui s'étire ensuite jusqu'à rupture. Dans ce test la valeur de la tension lors de la rupture du pont fondu est aux environs de 1 V, valeur qui coïncide avec le seuil théorique d'ébullition de l'or : 0.97V. Après rupture de ce pont fondu, la phase d'arc métallique commence et peut être clairement identifiée lors de ce test grâce au palier observable aux alentours de 11V. Cette valeur de tension d'arc est cohérente avec les valeurs bibliographiques relevées pour la phase métallique d'un arc entre des contacts en or. Cependant, comme nous pouvons le remarquer, aucune phase d'arc gazeux, qui se traduirait par la présence d'un ou plusieurs paliers aux alentours de 25-30 V, n'est observable¹⁸.

Ces observations sont cohérentes et révèlent que suite à la rupture du pont fondu un arc en phase métallique d'une durée de 4 μ s s'est développé. Cet arc ne s'est cependant pas ensuite transformé en arc gazeux. Cette observation est absolument répétable, ces

¹⁸ Nous remarquons sur la figure 10 que la tension est de 30V à partir de 4 μ s. Cette tension ne correspond pas à un palier d'arc, le courant étant nul. Il s'agit d'une surtension engendrée par la présence du circuit RLC composé de la capacité parasite du MEMS (et des sondes : 6pF) et de la résistance bobinée. Cette surtension est appelée « pointe d'extinction » [Pelenc2002].

essais ayant été effectués une dizaine de fois chacun. Ceci s'explique par la faible distance inter-électrodes du micro-interrupteur, même à l'état complètement ouvert ($< 10\mu\text{m}$). Un espacement si réduit ne permet pas au gaz environnant de pénétrer dans l'espace inter-électrodes et donc d'interagir avec les électrons pour créer un arc gazeux, vérifiant ainsi les conclusions de la littérature [Rieder2000].

2.3. Mesures à 5V / 1mA

Les mêmes tests ont alors été effectués dans les conditions des tests d'endurance du micro-interrupteur. La tension est fixée à 5V et le courant est limité à 1mA à l'aide d'une résistance de $5.1\text{k}\Omega$. Les oscillogrammes obtenus lors de la phase de fermeture (a) et d'ouverture (b) du contact sont présentés en Figure 102.

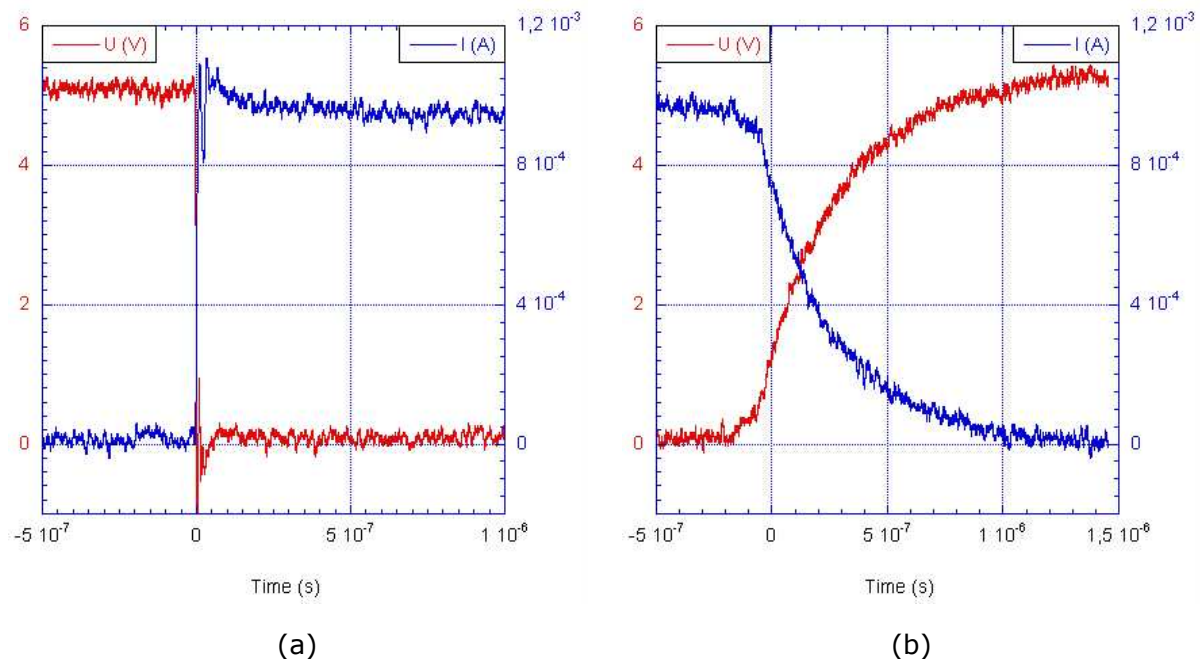


Figure 102. Oscillogrammes obtenus lors de la commutation du micro-interrupteur sous 5V/1mA. (a) Fermeture. (b) Ouverture.

Ces oscillogrammes indiquent qu'aucun rebond lors de la fermeture du contact n'est observable, ce qui est un point positif, un arc électrique pouvant se développer lors d'un rebond exactement de la même manière que lors de l'ouverture. De plus, aucune décharge électrique n'est observable durant la fermeture du contact, ni pendant l'ouverture. Nous remarquons qu'une capacité parasite se charge lors de l'ouverture des contacts, le rétablissement de la tension n'étant pas immédiat une fois le contact ouvert. L'extraction de la constante de temps du circuit permet de conclure qu'une capacité parasite de 28pF est présente en parallèle du micro-interrupteur, valeur cohérente avec les mesures effectuées (capacité parasite engendrée par (a) le packaging du MEMS $\sim 10\text{pF}$ et (b) le support PCB $\sim 20\text{pF}$).

Aucun arc électrique ou décharge diélectrique n'a donc été mis en évidence lorsque le micro-interrupteur opère sous 5V / 1mA. Les transferts de matière observés lors des tests d'endurance à ce calibre ne sont donc pas explicables à ce stade de l'étude.

2.4. Mesures à 14V / 10mA

Au calibre 14V/10mA, la probabilité de l'apparition d'un arc métallique lors de l'ouverture n'est pas négligeable. Pour vérifier qu'un tel arc apparaît, les mêmes tests ont été effectués en fixant la tension à 14V et en limitant le courant à 10mA à l'aide d'une résistance de 1.2k Ω . Les oscillogrammes obtenus lors de la fermeture (a) et lors de l'ouverture (b) sont rapportés sur la Figure 103.

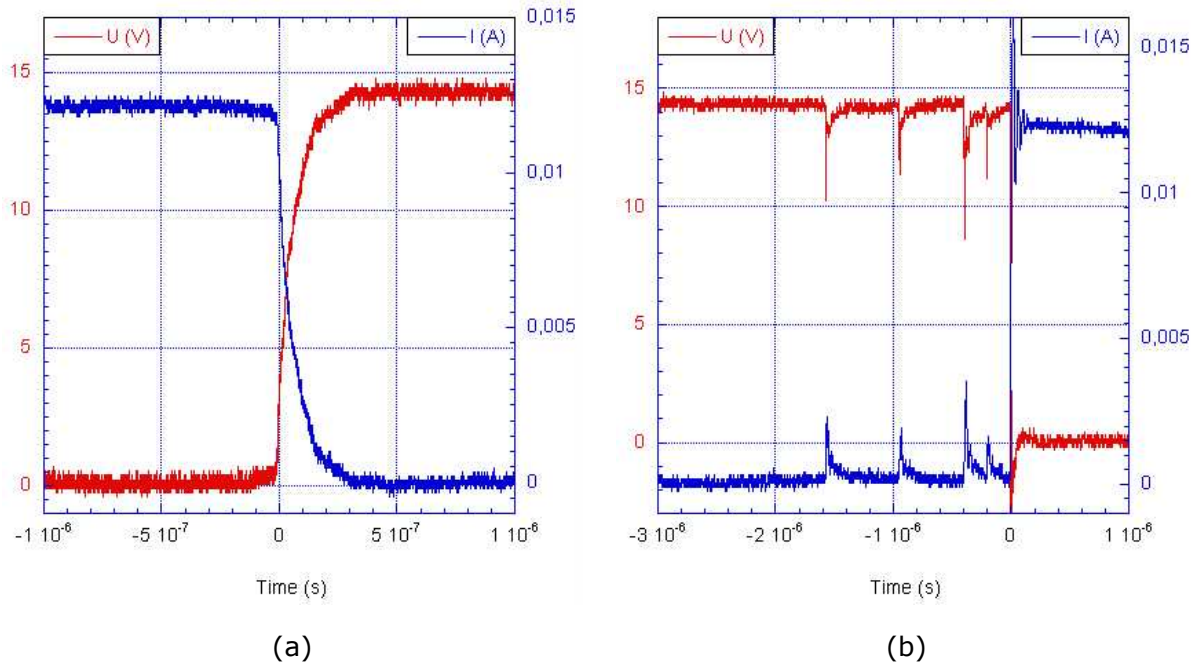


Figure 103. Oscillogrammes obtenus lors de la commutation du micro-interrupteur sous 14V/10mA. (a) Ouverture. (b) Fermeture.

Ces deux oscillogrammes fournissent les informations suivantes :

- Lors de l'ouverture du contact aucun arc métallique n'est visible, même en procédant à des acquisitions plus fines de la zone d'ouverture. Cette absence d'arc métallique alors que la tension est supérieure au seuil d'ionisation de l'or, et même à U_{\min} , est en accord avec la littérature disponible. En effet, le courant minimal nécessaire à l'apparition d'un arc métallique n'est pas bien défini, mais en dessous de 100mA jamais aucun arc métallique n'a été rapporté [Jemaa1987].
- Lors de la fermeture du contact, aucune tension d'arc n'est observable non plus. Cependant quelques microsecondes avant la fermeture du contact, des événements électriques peuvent être remarqués, et ce de façon systématique. Des vues élargies de ces pics de courant sont présentés sur la Figure 104 et nous pouvons remarquer que le courant monte jusqu'à 3mA en une dizaine de nanosecondes seulement (b). Cependant aucune tension d'arc n'est observable, le phénomène n'est donc pas lié à l'apparition d'un arc métallique.

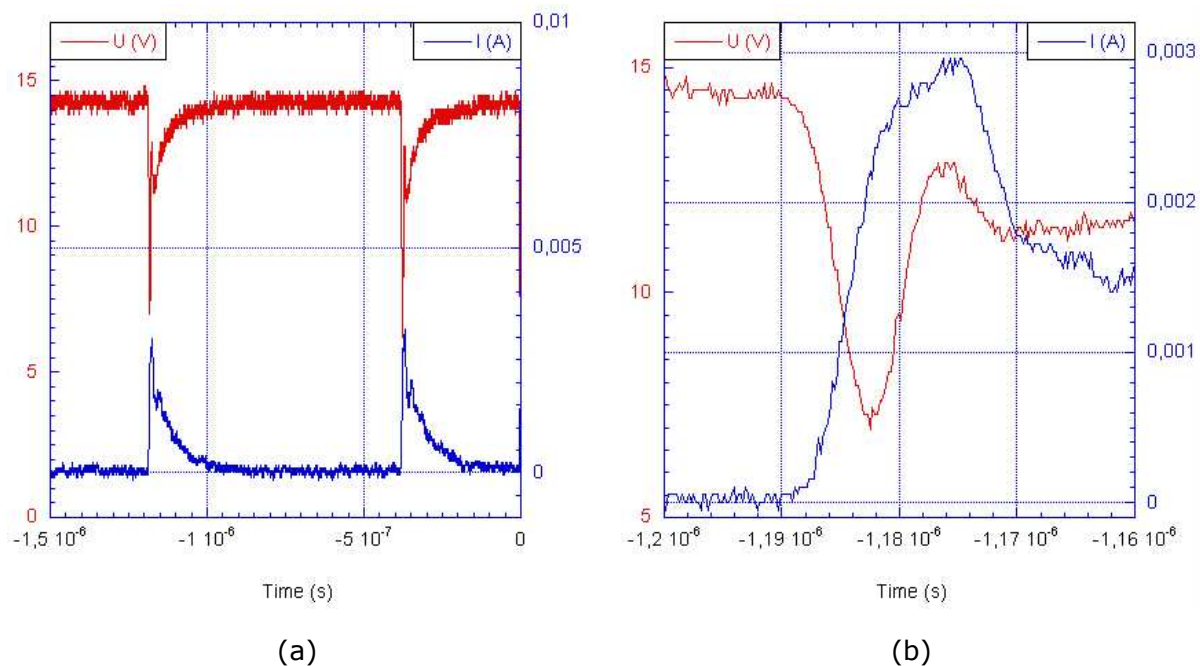


Figure 104. Agrandissements des évènements électriques se produisant quelques microsecondes avant la fermeture du contact sous 14V/10mA.

Il est difficile d'étudier plus précisément ces pics de courant directement sur le micro-interrupteur. En effet, durant ces tests l'aimant d'actionnement se déplace à une vitesse de 1.5 mm/s. Or les pics de courant ont lieu quelques microsecondes avant la fermeture définitive du contact. Durant ce laps de temps, l'aimant se déplace donc de quelques nanomètres seulement ! Le micro-interrupteur, par sa conception même, se ferme trop rapidement pour notre mesure, l'étude des derniers instants avant la fermeture du contact est donc difficilement accessible dans ces conditions.

Nous avons en effet mesuré dans le chapitre 1 que la membrane du micro-interrupteur se déplace avec une vitesse moyenne de 20 mm/s lors de la fermeture du contact. Le phénomène que nous observons se produit en moyenne 2 microsecondes avant la fermeture définitive du contact. Nous en déduisons que la distance inter-contacts à laquelle le phénomène apparaît est d'environ 40nm. Il s'agit donc réellement des derniers instants avant la fermeture du contact.

2.5. Conclusions partielles

Comme nous venons de le voir, nous avons écarté au début de ce chapitre les hypothèses d'évaporation sous champ, d'électromigration et de transfert fin. La présence d'un arc électrique en phase gazeuse était peu probable et nous avons vérifié qu'effectivement, même en conditions d'arc, aucun arc gazeux ne se produisait. Toutefois la présence d'un arc en phase métallique n'était pas impossible, cependant nous avons montré qu'un tel phénomène était absent aux valeurs de tension et courant auxquelles le micro-interrupteur opère. Le seul phénomène ayant pu être mis en évidence est l'apparition de pics de courant durant les derniers instants précédant la fermeture du contact sous 14V/10mA. Ces pics de courant pourraient être liés à des claquages diélectriques liés à la très faible distance inter-contacts subsistant lors des derniers instants de fermeture du contact.

Ces événements sont cependant très brefs ($\sim 10\text{ns}$) et difficilement observables sur le micro-interrupteur. De plus, de tels pics de courant n'ont pas été remarqués sous $5\text{V}/1\text{mA}$. Soit de tels phénomènes n'ont pas lieu à 5V , soit le phénomène est encore plus bref et les valeurs de courant sont encore plus faibles ; une mesure à l'oscilloscope n'est donc pas appropriée.

La suite de ce chapitre présente le développement d'un banc de test dédié à l'étude fine des phénomènes électriques mis en jeu lors de la commutation d'un micro-contact sous courant. Ce banc est basé sur une utilisation non conventionnelle d'un microscope à force atomique (AFM).

3. Développement d'un banc de test dédié

Pour étudier plus précisément les phases d'ouverture et de fermeture d'un micro-contact électrique sous courant, nous avons choisi de développer un banc de test reproduisant le fonctionnement d'un micro-interrupteur tout en contrôlant précisément sa vitesse d'actionnement. Ceci nous permettra d'étudier plus en détail les phénomènes de claquage diélectrique qui semblent se produire lorsque la distance inter-contacts est réduite à quelques dizaines de nanomètres ou moins.

3.1. Cahier des charges

Le contact électrique dans un micro-interrupteur se différencie d'un contact électrique macroscopique principalement par sa faible force de contact ($100 - 500 \mu\text{N}$), sa surface de contact réduite ($< 1\mu\text{m}^2$), la faible rugosité des surfaces de contact (quelques nm) et la faible épaisseur des matériaux de contact ($< 1\mu\text{m}$). Ces quatre paramètres caractérisent un micro-contact, et constituent les principaux critères de conception de notre banc de test. Le contrôle de l'environnement de test est aussi un atout non négligeable pour pouvoir étudier l'influence de l'atmosphère gazeuse sur les phénomènes que nous observons. Comme nous l'avons vu, en effet, si des phénomènes de claquage diélectrique sont mis en jeu lors de la commutation, le milieu diélectrique entre les deux contacts risque de jouer un rôle non négligeable.

Le banc de test à développer doit nous permettre d'étudier précisément les phases d'ouverture et de fermeture du micro-contact. Pour cela, il doit être possible de contrôler très précisément la vitesse de commutation du micro-contact expérimental. De plus, il doit nous permettre de procéder à des cyclages, dans le but d'étudier l'effet cumulé des phénomènes électriques que nous mettrons en évidence. Un état de l'art détaillé du domaine des bancs de test de micro-contacts a été présenté dans le chapitre précédent. Il en ressort que les dispositifs utilisés habituellement pour ce genre d'étude sont basés soit sur un nanoindenteur, soit sur un microscope à force atomique (AFM). C'est la solution de l'AFM que nous avons alors retenue.

Nous avons, en effet, procédé dans le chapitre 2 à des caractérisations par AFM à pointe conductrice (SSRM et Résiscope), et nous allons donc nous appuyer sur cette expertise et l'AFM utilisé pour développer rapidement le banc de test dont nous avons besoin. L'AFM utilisé durant ces tests est un AFM Veeco Nanoscope D3100 appartenant à la plateforme de nano-caractérisation du CEA-Leti et qui présente l'avantage, outre d'être déjà équipé

pour réaliser des caractérisations électriques, de posséder un caisson étanche permettant de réaliser les tests sous azote.

3.2. L'AFM à pointe conductrice

La microscopie à force atomique (AFM pour *Atomic Force Microscopy*) est une technique permettant d'imager des surfaces à l'échelle atomique. Développée à la fin des années 1980 sur la base de la microscopie à effet tunnel, elle permet d'étudier tous types de matériaux, grâce à un principe simple. La surface est balayée par un stylet muni d'une pointe de rayon nanométrique et ce sont les forces d'interaction existant entre cette pointe et la surface qui permettent de relever la topographie atomique des surfaces étudiées. Ce stylet est classiquement appelé *cantilever* ou levier, et est fabriqué en technologie silicium, ce qui permet de réaliser aussi la pointe nanométrique (cf. Figure 105) présente à son extrémité et qui est indispensable au fonctionnement du dispositif.

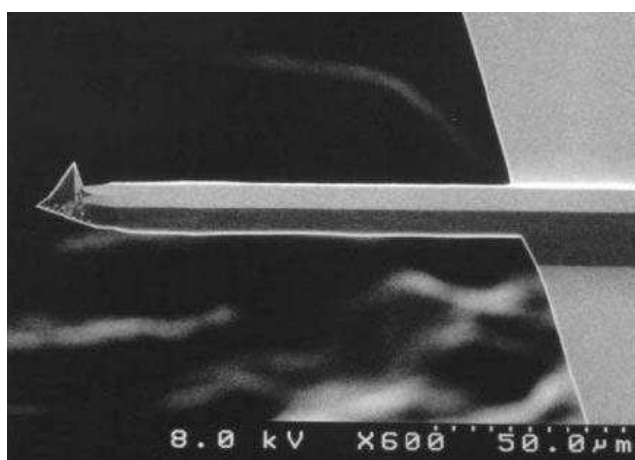


Figure 105. Observation MEB d'un levier en silicium utilisé dans un AFM. La pointe dont le rayon de courbure est nanométrique est visible à son extrémité. (CPMOH, Bordeaux)

Dans son mode d'utilisation le plus simple, le mode contact à hauteur constante, un actionneur piézoélectrique amène la pointe nanométrique en contact avec la surface à étudier. Deux autres actionneurs piézoélectriques permettent ensuite de cartographier la surface en X et en Y, la pointe nanométrique restant en contact permanent avec la surface. La pointe suit fidèlement la topographie de la surface, la résolution étant limitée par le rayon de courbure de la pointe. La topographie est enregistrée en mesurant la déflexion de l'extrémité du levier à l'aide d'un laser et d'une diode photoélectrique segmentée (cf. Figure 106). Ce mode est cependant limité à la caractérisation de surfaces très peu rugueuses.

Le mode le plus utilisé est le mode contact à déflexion constante. Dans ce cas, la déflexion du levier est maintenue à une valeur de consigne grâce à une boucle d'asservissement, de façon à assurer un contact permanent suivant fidèlement la topographie de l'échantillon. La force correspondante ne doit cependant pas être trop élevée pour éviter d'endommager la surface de l'échantillon ou la pointe. Les pressions locales peuvent en effet être très importantes, le rayon de courbure de la pointe étant nanométrique. Les forces mises en jeu sont généralement de l'ordre de quelques nano-

newtons à quelques centaines nano-newtons, selon la raideur des leviers utilisés (de 0.2 N/m à 40 N/m pour les plus courants).

La microscopie à pointe conductrice est une adaptation de l'AFM dans laquelle, en plus de relever la topographie d'une surface, un relevé simultané des propriétés électriques de la surface est effectué. Le principe est identique à l'AFM, à la différence près que les pointes utilisées sont conductrices. Ainsi, en appliquant une polarisation entre la pointe et l'échantillon et en mesurant le courant traversant le contact pointe-substrat, il est possible de réaliser des cartographies de résistance des surfaces explorées (cf. Figure 106). Différents dispositifs sont disponibles pour réaliser ce type de mesures, se démarquant par la gamme de résistances mesurables et donc les applications. On peut citer le C-AFM (pour *Conductive AFM*), le CS-AFM (pour *Current Sensing AFM*), le TUNA (pour *Tunneling AFM*), le SSRM (pour *Scanning Spreading Resistance Microscope*) et le Résiscope. Le SSRM est une technique proposée par Veeco, tandis que le Résiscope est une technique développée par le laboratoire de génie électrique de Paris (LGEP) et commercialisée par Scientec.

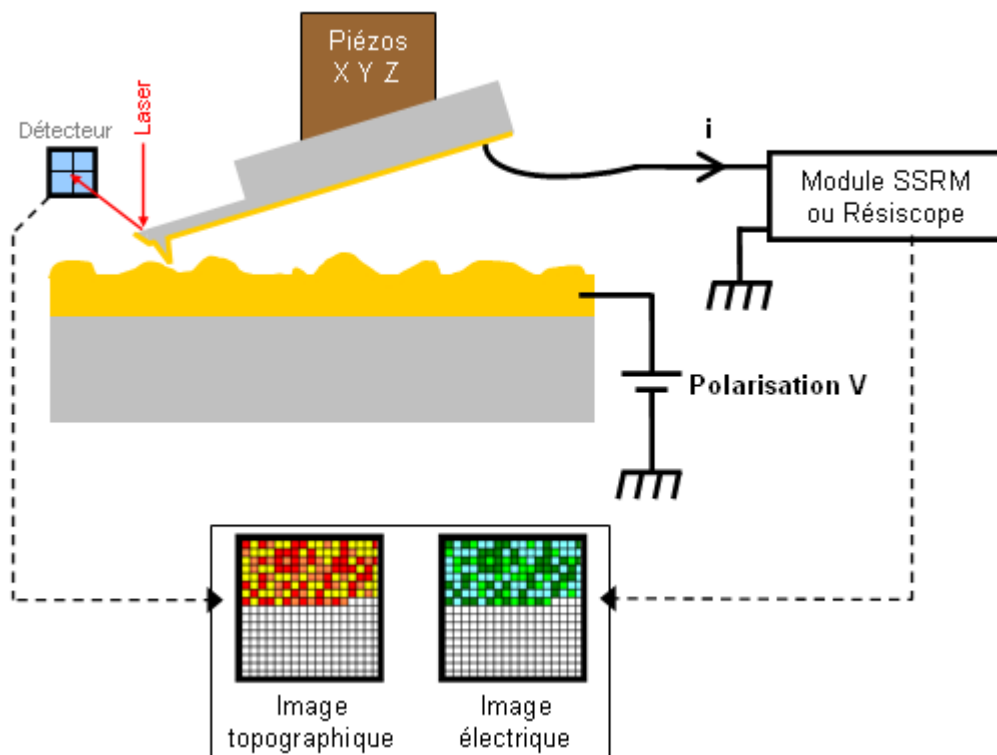


Figure 106. Principe de fonctionnement de l'AFM à pointe conductrice.

Comme nous venons de le voir, l'AFM permet d'appliquer sur des surfaces des forces de contact très faibles et très bien contrôlées. En le couplant au mode SSRM ou Résiscope il est en plus possible de mesurer des résistances de contact. Enfin, les technologies utilisées pour la réalisation des leviers sont des technologies silicium identiques à celles mises en œuvre pour la fabrication du micro-interrupteur. De tels atouts désignent l'AFM comme un outil adéquat au développement d'un banc de test reproduisant le fonctionnement d'un micro-contact électrique.

En particulier, l'AFM possède un mode approche/retrait (ou « mode force ») qui permet de réaliser des mises en contact successives, tout en contrôlant la force appliquée. Ce mode est très utilisé pour accéder aux propriétés adhésives et élastiques des matériaux à l'échelle atomique. En utilisant l'AFM en mode approche/retrait, avec une pointe et un échantillon conducteurs, il est alors possible de reproduire le fonctionnement d'un micro-interrupteur MEMS. L'avantage évident de cette approche est que les ordres de grandeur des forces et des surfaces de contact mis en jeu peuvent être très proches de ceux du micro-interrupteur.

Toutefois, la géométrie du contact est mal adaptée, une pointe AFM présente un rayon de courbure de quelques nanomètres, beaucoup trop faible par rapport à la géométrie de contact du micro-interrupteur. De plus, les forces de contact dans un AFM sont plus proches du nano-newton que du micro-newton généralement. Nous allons alors voir comment ce problème peut être résolu grâce à l'utilisation de leviers AFM adaptés.

3.3. Leviers AFM

La force appliquée dans un AFM dépend directement de la raideur (k) du levier utilisé. Le système étant une poutre encastrée libre, la force de contact (F) appliquée par le levier sur une surface indéformable est directement proportionnelle au déplacement vertical (δ) de la zone du levier qui entre en contact avec la surface (cf. Figure 107).

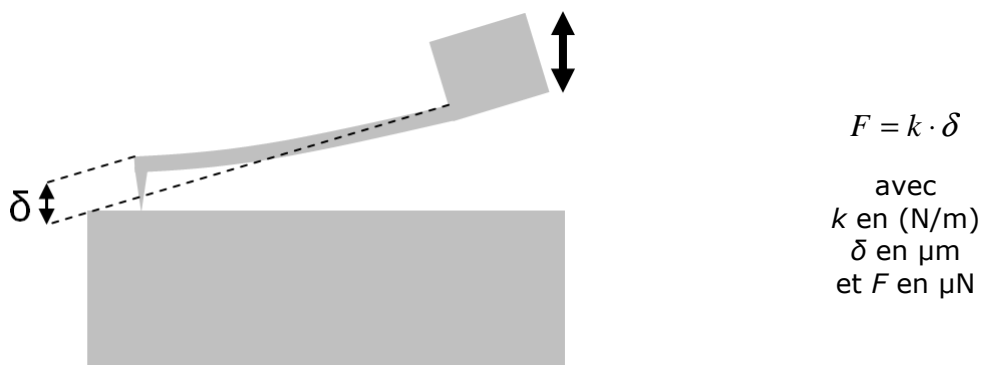
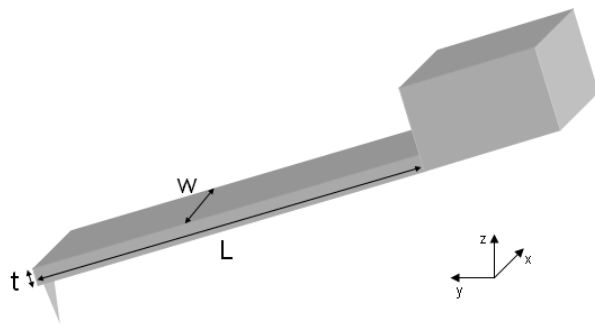


Figure 107. Calcul de la force de contact appliquée par un levier AFM sur une surface.

Classiquement, la raideur des leviers AFM est comprise entre 0.01 et 50 N/m, en fonction des modes AFM auxquels ils sont destinés. Avec des raideurs aussi faibles, il est difficile d'appliquer des forces de contact représentatives d'un micro-interrupteur ($\geq 100\mu\text{N}$). Nous risquons en effet, soit de briser le levier, soit simplement de dépasser la déflexion maximale mesurable à l'aide du faisceau laser. Nous allons donc avoir besoin de leviers avec une raideur importante, raideur qui se calcule comme explicité ci-dessous sur la Figure 108 ci-dessous.



$$k = \frac{E \cdot w \cdot t^3}{4 \cdot L^3}$$

avec

E : module de Young (N/m^2)

w : largeur (m)

t : épaisseur (m)

L : longueur (m)

et k en N/m

Figure 108. Définition des paramètres géométriques d'un levier AFM.

La déflexion du levier AFM est mesurée à l'aide d'un faisceau laser se réfléchissant sur la face arrière du levier. La déviation du laser engendrée par cette déflexion est alors mesurée à l'aide d'une photodiode à quatre quadrants. La gamme de mesure de cette photodiode est comprise entre -9.8 et +9.8 Volts. Il est possible d'agir sur la valeur de consigne pour avoir accès à la gamme supérieure ou inférieure de ces valeurs. Cependant, ceci se fera au détriment des phénomènes correspondants : le choix d'une consigne négative par exemple permettra d'avoir accès à l'intervalle supérieur, et donc appliquer une force plus importante sur la surface même avec une raideur de levier faible. Cependant nous n'aurons alors plus accès aux forces d'attraction et d'adhésion (intervalle inférieur de la photodiode). Nous devons donc rester dans un intervalle adapté à nos besoins, intervalle d'environ 9V de débattement.

Sur notre système, 1V correspond à 80nm de déflexion du levier (qui peut varier légèrement en fonction du levier AFM utilisé). Nous avons donc accès à une déflexion de levier maximale de 720nm. Appliquer une force de contact de 100 μN ou plus en se limitant à 720nm de déflexion nous contraint à utiliser un levier de raideur minimale :

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{720 \cdot 10^{-9}} \approx 140 \text{ N/m}$$

Une étude auprès des fournisseurs de leviers AFM révèle qu'il est possible de se procurer des leviers possédant des raideurs appropriées, certains à un prix exorbitant (NanoAndMore, leviers en saphir, k jusqu'à 10kN/m, 1200€ pièce), d'autres à un tarif plus abordable (Veeco Probes, leviers Tap525 Tipless, $k \sim 200\text{N/m}$, 6100€ le wafer de 360 leviers).

Un second point est cependant à prendre en compte : la géométrie de contact. Le micro-interrupteur développe une force de contact de 100 μN et plus, mais la surface de contact sollicitée dépend de la forme du contact. Une pointe AFM n'est pas du tout représentative de notre géométrie de contact, et génère des pressions de contact importantes, très éloignées des conditions de fonctionnement d'un micro-relais MEMS. La solution la plus simple consiste à se procurer des leviers *Tipless*, c'est-à-dire dépourvus de pointe, généralement disponibles en catalogue. Une telle géométrie de contact se rapproche de la géométrie du micro-interrupteur, qui comme nous l'avons vu précédemment présente un contact du type arête sur plan.

Les leviers Tap525 Tipless que nous nous sommes procurés chez Veeco Probes ont été caractérisés par microscopie électronique à balayage dans le but de vérifier leurs dimensions et leur forme (cf. Figure 109). La mesure des dimensions permet de vérifier que l'ordre de grandeur pour la raideur de ces leviers est bien de 200 N/m.

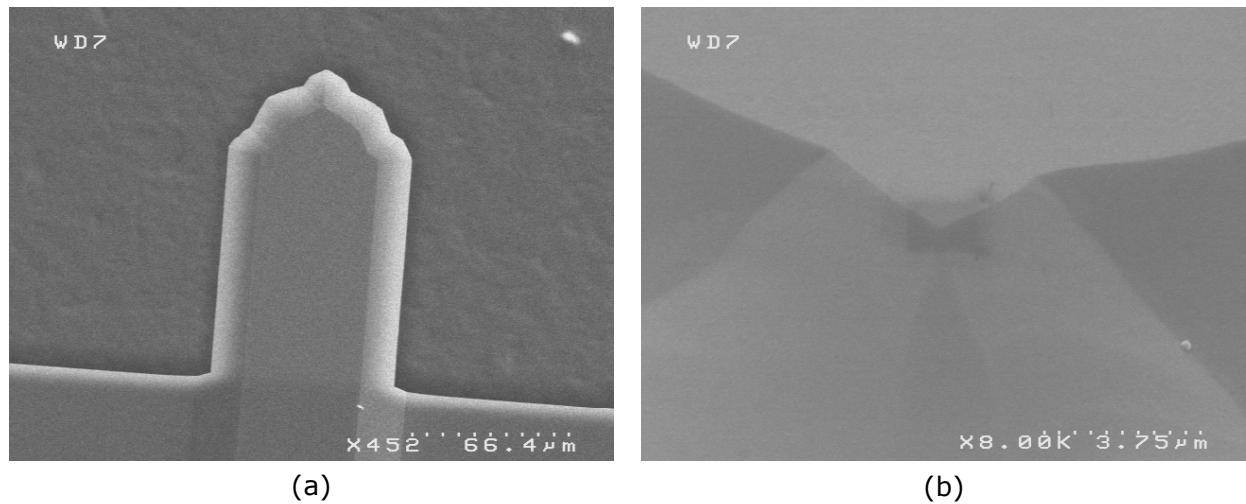


Figure 109. Observation MEB des leviers AFM dépourvus de pointe fournis par Veeco Probes. (a) Vue globale. (b) Zoom sur l'extrémité du levier (zone de contact).

Cependant, pour notre application nous sommes amenés à déposer des matériaux conducteurs sur les leviers. Ce dépôt modifie la raideur originale du levier, d'autant plus que les matériaux déposés sont contraints. Il est donc indispensable de pouvoir mesurer précisément la raideur des leviers après dépôt, de simples considérations géométriques ne suffisant pas. La fréquence de résonance d'un tel levier dépend de sa raideur et de sa masse, comme le montre la formule suivante.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{eff}}}$$

Il est ainsi possible de remonter à la raideur effective d'un levier en connaissant sa fréquence de résonance. Certains modes de l'AFM sont basés sur l'utilisation de la fréquence de résonance du levier et connaître cette fréquence ainsi que son facteur de qualité est donc aisée. Cependant il est aussi nécessaire de connaître la masse (effective) du levier pour remonter à sa raideur et donc ses dimensions exactes et sa densité, chose mal aisée dans notre cas. Heureusement Sader et al. [Sader1999] proposent une méthode, très largement utilisée, qui permet de s'affranchir de la connaissance de la densité du levier et de son épaisseur. C'est cette méthode que nous utilisons pour caractériser nos leviers AFM après le dépôt de nos matériaux de contact¹⁹.

L'observation des leviers (cf. Figure 109) révèle que leur extrémité, qui constituera la zone de contact, est de forme pyramidale, légèrement différente de l'arête à laquelle nous nous attendons. Cette forme pyramidale est due au procédé de fabrication des leviers utilisant une gravure KOH qui génère des angles de 55° entre les plans (100) et (111) du silicium. Nous constaterons par la suite que cette géométrie permet toutefois

¹⁹ Calibration online des cantilevers en utilisant la méthode de Sader : <http://www.ampc.ms.unimelb.edu.au/afm/calibration.html>

d'obtenir des surfaces de contact de taille similaires à celles observées dans le micro-interrupteur.

3.4. Instrumentation

La partie « mécanique » du banc de test étant assurée par l'utilisation de l'AFM, il convient maintenant de s'intéresser à la partie électrique. Comme nous l'avons vu précédemment, les phénomènes que nous souhaitons observer sont très dépendants des tensions et des courants auxquels le contact opère. Ils convient donc de travailler aux mêmes valeurs que celles utilisées précédemment, à savoir 5V/1mA et 14V/10mA. Dans un premier temps nous commencerons par étudier le cas du 5V/1mA, conditions dans lesquelles aucun phénomène électrique n'a pu être mis en évidence jusqu'ici alors que des dégradations d'origine électrique ont été observées.

Malheureusement le module SSRM de l'AFM ne supporte pas des courants supérieurs à 0.1 mA. L'utilisation de ce module pour connecter le levier AFM au circuit extérieur est donc proscrite. Heureusement un module permettant simplement de venir reprendre un contact électrique sur un levier AFM a été développé auparavant au CEA-Leti et nous allons l'utiliser pour connecter électriquement nos leviers AFM préalablement métallisés (cf. Figure 110). La connexion des substrats n'est pas un problème, des lamelles métalliques étant prévues d'origine sur le porte-échantillon, nous reprenons le contact simplement avec un fil soudé.

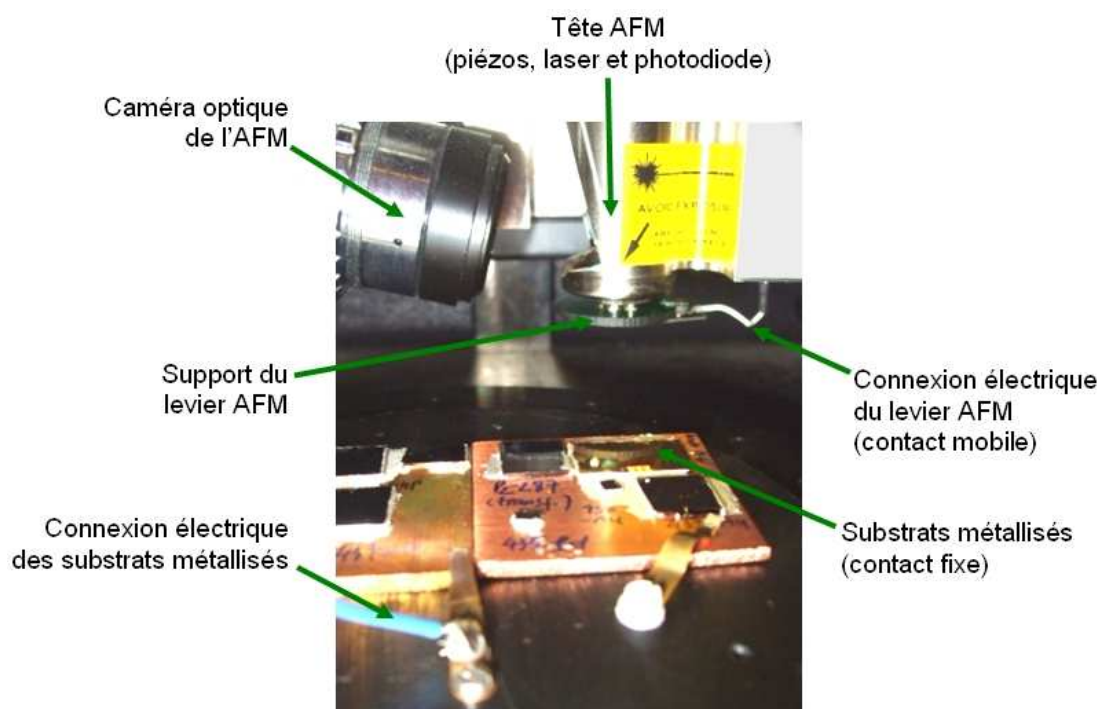


Figure 110. Photo du banc de test développé.

Le circuit électrique permettant d'alimenter le micro-contact est le même que précédemment, à savoir une charge résistive. Ainsi nous imposons 5V à l'aide d'un générateur de tension et nous limitons le courant à l'aide d'une résistance. Ce principe a toutefois été légèrement amélioré, suite à l'observation de signaux transitoires

indésirables lors de la commutation de la source de tension. Nous avons alors opté pour un montage en pont diviseur de tension qui permet de laisser en permanence la source de tension sous charge, et qui débite un courant du même ordre de grandeur que celui que nous utilisons. En procédant ainsi nous avons éliminé les signaux transitoires observés précédemment. Le montage, inspiré de [Hansen1997], est présenté sur la figure suivante.

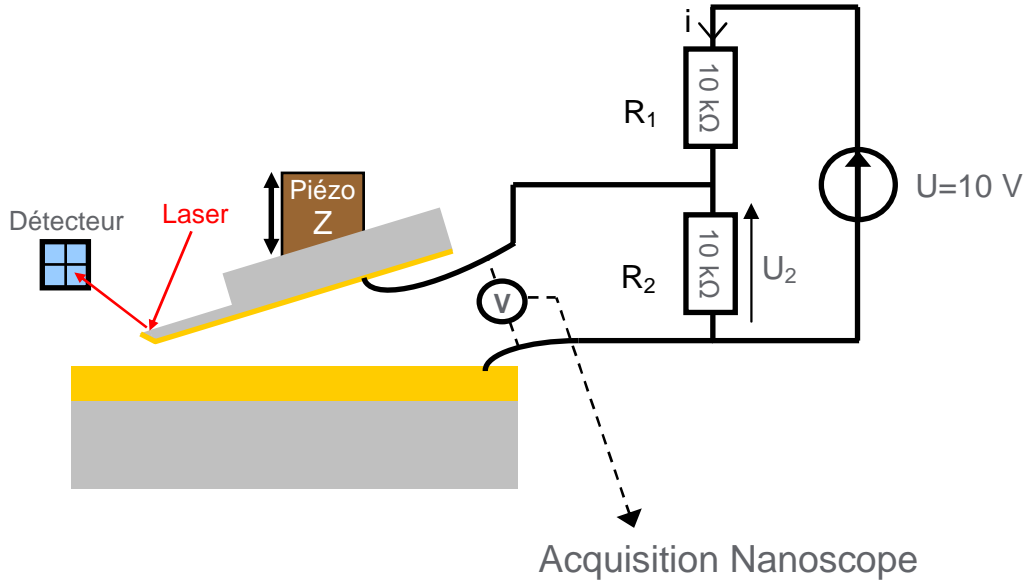


Figure 111. Principe du banc de test simulant un micro-contact.

Lorsque le contact est ouvert, nous avons

$$U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5V ,$$

et lorsque le contact est fermé, si $R_{contact} \ll R_2$, nous avons

$$i = \frac{U}{R_1} = 1mA .$$

Nous commutons donc bien notre contact sur une charge résistive 5V/1mA et nous pouvons calculer la valeur de la résistance totale R_C (comprenant la résistance de contact, la résistance du levier et la résistance de la connectique) pendant les phases de commutation ainsi :

$$R_C = \frac{U_2}{\frac{U - U_2}{R_1} - \frac{U_2}{R_2}}$$

Le signal de tension U_2 , correspondant à la chute de potentiel aux bornes du contact, est injecté via une entrée auxiliaire dans l'électronique de traitement de l'AFM qui synchronise la mesure de tension avec la mesure de déflexion du levier. Ce montage permet d'étudier de façon simultanée les comportements mécanique et électrique du

contact lors des phases de commutation, et leur évolution dans le temps grâce à l'interface du Nanoscope qui permet d'enregistrer les signaux synchronisés.

3.5. Echantillons

La métallisation des leviers AFM est réalisée par évaporation sous vide, à la Plateforme de Technologie Amont (PTA). Seule la face supérieure des leviers, qui entre en contact avec le substrat est métallisée. Nous déposons un empilement constitué de 20nm de chrome, suivi de 50nm de nickel et enfin 200nm d'or qui est le matériau de contact (cf. Figure 112). Le chrome est utilisé comme couche d'accroche et le nickel comme barrière de diffusion permettant d'éviter que le chrome ne vienne contaminer l'or. Cet empilement technologique est similaire à celui utilisé dans le micro-interrupteur MEMS.

Les substrats utilisés pour réaliser la partie fixe du contact sont des morceaux de wafers 200mm clivés. Les dépôts ont été effectués pleine plaque sur des wafers de silicium préalablement oxydés thermiquement (500nm). Le dépôt des trois matériaux étudiés (Au, Ru et W) est effectué par pulvérisation (*sputtering*), avec une épaisseur de 500nm. L'or ayant une très mauvaise accroche sur les oxydes, une couche d'accroche en W/WN est préalablement déposée par la même méthode. Lors du clivage, la couche de tungstène a tendance à se décoller du substrat, ce qui indique que le dépôt de tungstène est très contraint.

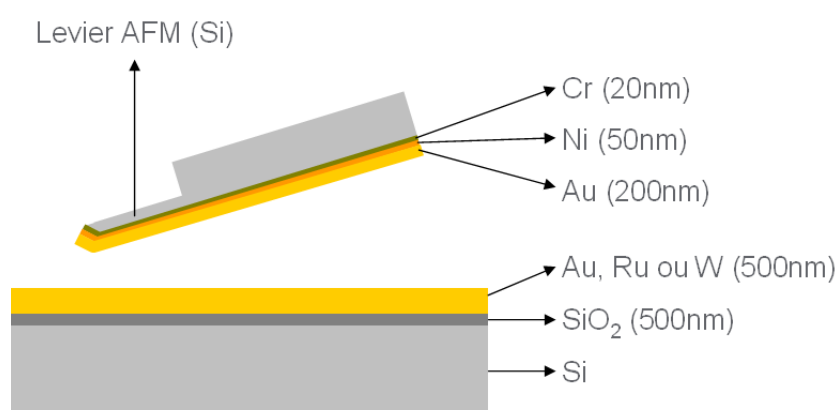


Figure 112. Empilements technologiques réalisés sur les leviers et sur les substrats.

Les matériaux sont caractérisés par AFM et nanoindentation, et leurs caractéristiques sont rapportées dans le tableau suivant.

Matériau	Au (substrat)	Au (levier AFM)	Ru (substrat)	W (substrat)
Rugosité RMS (nm)	1.25	0.98	1.86	3.97
Dureté (GPa)	1.3 ± 0.2	-	22.2 ± 10	15.6 ± 2.3
Module de Young (GPa)	110 ± 11	-	440 ± 297	253 ± 17

Tableau 18. Propriétés des matériaux déposés sur les leviers et les substrats.

En utilisant la méthode de Sader, la raideur des leviers est estimée grâce à leur fréquence de résonance et le facteur de qualité associé. Il s'avère que les valeurs sont assez dispersées, allant de 139 à 201 N/m avec une moyenne aux environs de 175 N/m.

4. Validation du banc de test

4.1. Observation d'un cycle de commutation du contact

Le mode approche/retrait de l'AFM est basé sur la seule utilisation de l'actionneur piézoélectrique assurant le déplacement vertical (z) du levier et de la détection laser associée à l'extrémité du levier (cf. Figure 111). L'actionneur contrôle très précisément le mouvement vertical du levier, tandis que le laser permet de mesurer la déflexion de l'extrémité du levier. Dans ce mode, l'actionneur piézoélectrique (z) rapproche à une vitesse choisie allant de quelques nm/s à une dizaine de $\mu\text{m/s}$ le levier de la surface. La Figure 113 est alors l'enregistrement d'un cycle de commutation typique de notre micro-contact expérimental.

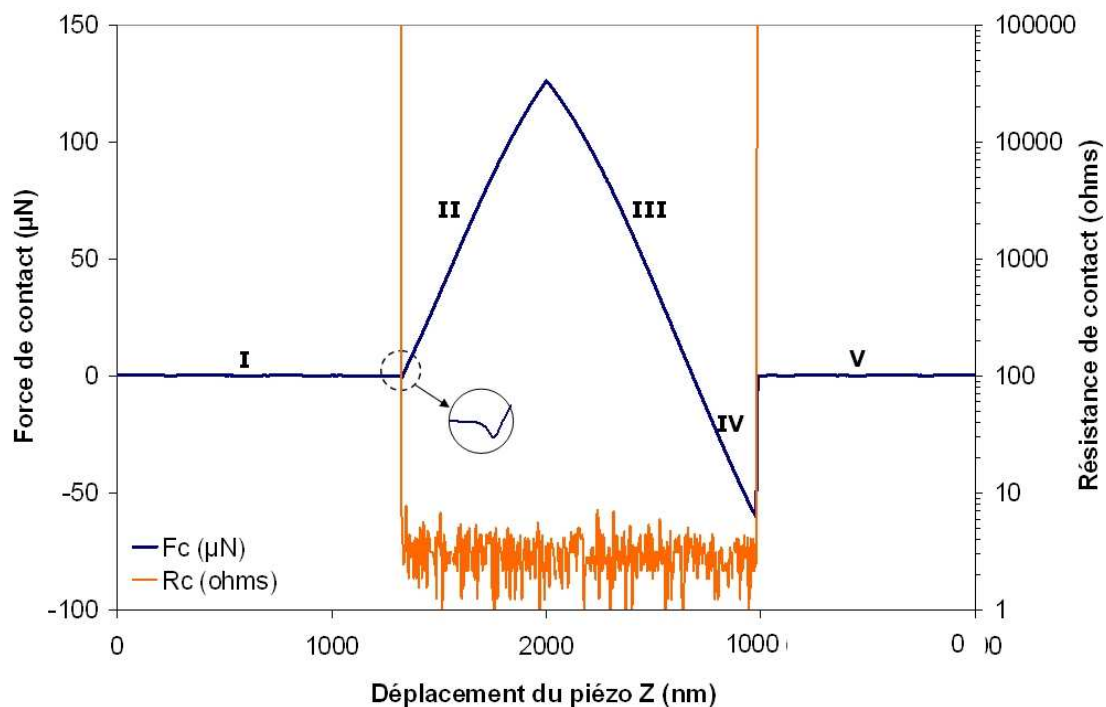


Figure 113. Cycle de commutation caractéristique sous 5V/1mA réalisé sur le micro-contact expérimental.

Ainsi, lorsque le levier est au dessus de la surface, sans contact avec la surface, la déflexion mesurée par le laser est nulle (zone I de la Figure 113). L'actionneur piézoélectrique (z) rapproche le levier de la surface à une vitesse contrôlée et lorsque le levier entre en contact avec la surface, le levier fléchit et le laser enregistre la déflexion à l'extrémité du levier (zone II). Cette déflexion peut ensuite être convertie directement en force de contact, comme explicité précédemment. La mise en contact est précédée d'une zone de déflexion négative (encart circulaire) qui traduit l'apparition de forces d'interaction à courte distance. Dans le cas d'un levier classique, souple, les forces d'interaction ainsi mesurables sont des forces attractives de proximité de type Van der

Waals. Dans notre cas le levier est très raide et donc peu sensible à ces forces de faible intensité. La déflexion négative que nous observons est l'effet de la force électrostatique liée à la différence de potentiel que nous appliquons entre le levier et le substrat, ce que nous vérifierons dans le paragraphe 6 de ce chapitre.

Au fur et à mesure que l'actionneur piézoélectrique continue son approche la force de contact augmente linéairement. La distance maximale parcourue par l'actionneur piézoélectrique peut être réglée précisément et conditionne dans notre cas la force de contact maximale appliquée. Une fois cette valeur maximale atteinte, l'actionneur (z) entame la remontée du levier, à vitesse toujours constante ; la force de contact est alors progressivement réduite (zone III).

Avant que le contact entre le levier et la surface ne se rompe définitivement, une zone de déflexion négative apparaît (zone IV). Cette zone résulte des interactions existant entre la surface et le levier et traduit un phénomène d'adhésion des deux surfaces, la valeur de force correspondante est appelée « force d'adhésion ». Cette force d'adhésion regroupe plusieurs phénomènes distincts : forces de proximité (Van der Waals, Casimir...), force électrostatique, force de capillarité, soudure locale... Une fois passée cette zone d'adhésion, le contact se rompt mécaniquement et la déflexion du levier redevient nulle (zone V). Le levier est maintenant au dessus de la surface, sans contact avec elle et l'actionneur (z) continue sa course verticale jusqu'à revenir à son point de départ.

Grâce au contrôleur de l'AFM nous pouvons acquérir simultanément le signal de déflexion du levier (donc la force) et la tension aux bornes du contact (U_2 sur la Figure 111) et donc superposer les comportements mécanique et électrique du contact durant un tel cycle d'approche/retrait. Le résultat d'une telle acquisition est décrit sur la Figure 113, où nous pouvons remarquer que le comportement mécanique du contact et le comportement électrique sont bien corrélés. En effet, la résistance de contact chute brusquement à $2,5\Omega$ lorsque le levier entre en contact avec la surface (transition zone I et II) et la résistance augmente brusquement lorsque le contact est mécaniquement rompu après la zone d'adhésion (transition zone IV et V).

En enchaînant de tels cycles d'approche/retrait, nous reproduisons le fonctionnement d'un micro-interrupteur et sommes donc capables d'étudier la dégradation d'un micro-contact dans des conditions très proches de celles que nous trouverions dans un micro-interrupteur.

4.2. Enchaînement des commutations : cyclage

Ces cycles d'approche/retrait peuvent être enchaînés à la vitesse désirée, le logiciel Nanoscope enregistrant les données en temps réel. Les données sont enregistrées dans un format propre à Veeco mais en s'appuyant sur des routines Matlab développées au CEA-Leti, nous avons élaboré un programme Matlab permettant d'extraire automatiquement les informations intéressantes. Nous obtenons pour chaque cycle d'approche/retrait effectué, la valeur de la force de contact maximale appliquée, la valeur de la résistance de contact correspondante ainsi que la valeur de la force d'adhésion.

De telles informations nous permettent de suivre l'évolution du contact électrique à mesure que celui-ci est sollicité. Le suivi de la force de contact maximale permet de s'assurer que les conditions de cyclage sont respectées. Si une hausse de la résistance de contact se produit, nous pouvons ainsi écarter l'hypothèse d'une force de contact

insuffisante. Le suivi de la force d'adhésion au cours du cyclage permet de suivre l'évolution de la surface de contact et en particulier l'apparition d'une éventuelle contamination surfacique [Dickrell2007].

Charge électrique	5V/1mA
Force de contact maximale	120 μ N
Vitesse de commutation	100 nm/s - 10 μ N/s
Matériau de contact	Au / Au
Atmosphère	Air (RH 30%)

Tableau 19. Paramètres de tests utilisés pour les cyclages.

Dans le but de valider le bon fonctionnement du banc de test, nous procédons à une série de cyclages dans des conditions similaires à celles dans lesquelles le micro-interrupteur a été testé dans le chapitre 2. Les paramètres utilisés sont présentés dans le Tableau 19 ci-dessus. Nous pouvons remarquer que la vitesse de commutation utilisée est très différente de celle du micro-interrupteur. Cette vitesse très réduite a été choisie dans le but d'amplifier les phénomènes de dégradation et donc de limiter volontairement la durée de vie du contact. En effet, le micro-interrupteur a une durée de vie typique d'un million de cycles lorsqu'il est testé sous 5V/1mA. Réaliser un million de cycles sur l'AFM est totalement exclu, même à la vitesse d'actuation maximale ceci prendrait plusieurs jours. Cependant tous les bancs de test publiés et similaires au nôtre mettent en évidence un vieillissement accéléré du contact. Ainsi, en quelques cycles ou quelques centaines de cycles seulement, le micro-contact expérimental est défaillant. La dégradation du contact semble donc très fortement liée à sa vitesse d'actuation, mais personne n'a pour l'instant expliqué ce phénomène. Dans le domaine macroscopique ce phénomène est connu et est lié à la durée pendant laquelle l'arc électrique se maintient entre les contacts. Mais dans notre cas, l'absence d'arc électrique nous interdit de raisonner par similitude avec le monde macroscopique.

Référence	Type de banc de test	Matériau de contact	Charge électrique	Vitesse de commutation (μ N/s)	Cycles avant défaillance
[NovaM2008]	Nanoindenteur	Au	5V/1mA	20	10
[Jang2008]	Nanoindenteur	Al	N/D	0.7	5
[Dickrell2007]	Nanoindenteur	Au	3.3V/3mA	10	20
[Yang2007]	AFM + piézo	Au	1V/1mA	100	100
[Yunus2008]	Piézo	Au	20mV/1mA	200	425
[Gilbert2008]	Nanoindenteur + piézo	Au	0 V	50	60,000
[Chen2007]	AFM + piézo	Au, AuRu	0 V	N/D	10 ⁷

Tableau 20. Analyse bibliographique des bancs de test similaires.

Dans le Tableau 20 les vitesses de commutation sont indiquées en μ N/s et non pas en nm/s. Les auteurs fournissent rarement les vitesses de commutation utilisées, et lorsqu'ils le font celles-ci sont souvent en μ N/s, valeur impossible à convertir en nm/s.

Ces données fournissent toutefois un ordre de grandeur et nous nous apercevons que dans tous les cas ces vitesses sont très inférieures à la vitesse de commutation d'un micro-interrupteur. Les durées de vie obtenues dans de telles conditions sont chaque fois très faibles, sauf bien évidemment lorsque le contact est sollicité de façon purement mécanique (deux dernières références du Tableau 20). Une relation directe entre vitesse de commutation et durée de vie semble donc probable.

Deux types de tests sont effectués, une série de commutation durant laquelle le levier AFM est polarisé positivement et le substrat négativement et une seconde série en inversant cette polarité. Le but de ces tests est de reproduire le comportement obtenu sur le micro-interrupteur, à savoir un transfert de matière directionnel dirigé de l'anode vers la cathode.

4.2.1. Levier AFM polarisé négativement (cathode)

Dans cette première série de tests (2 à 3 tests ont été effectués dans chaque polarité), le levier AFM est polarisé négativement et joue donc le rôle de cathode. 350 cycles sont effectués dans ces conditions, une tension constante de 5V étant appliquée aux bornes du contact et le courant étant limité à 1mA. Le programme Matlab que nous avons élaboré permet de tracer le graphique suivant représentant l'évolution de la résistance en fonction du nombre de cycles effectués. La valeur de tension utilisée pour calculer la résistance de contact est obtenue en réalisant une moyenne des 10 points correspondants aux valeurs les plus élevées de la force de contact. Les évolutions de la force de contact maximale, de la force d'adhésion et de la résistance d'un test typique sont alors illustrées sur la Figure 114.

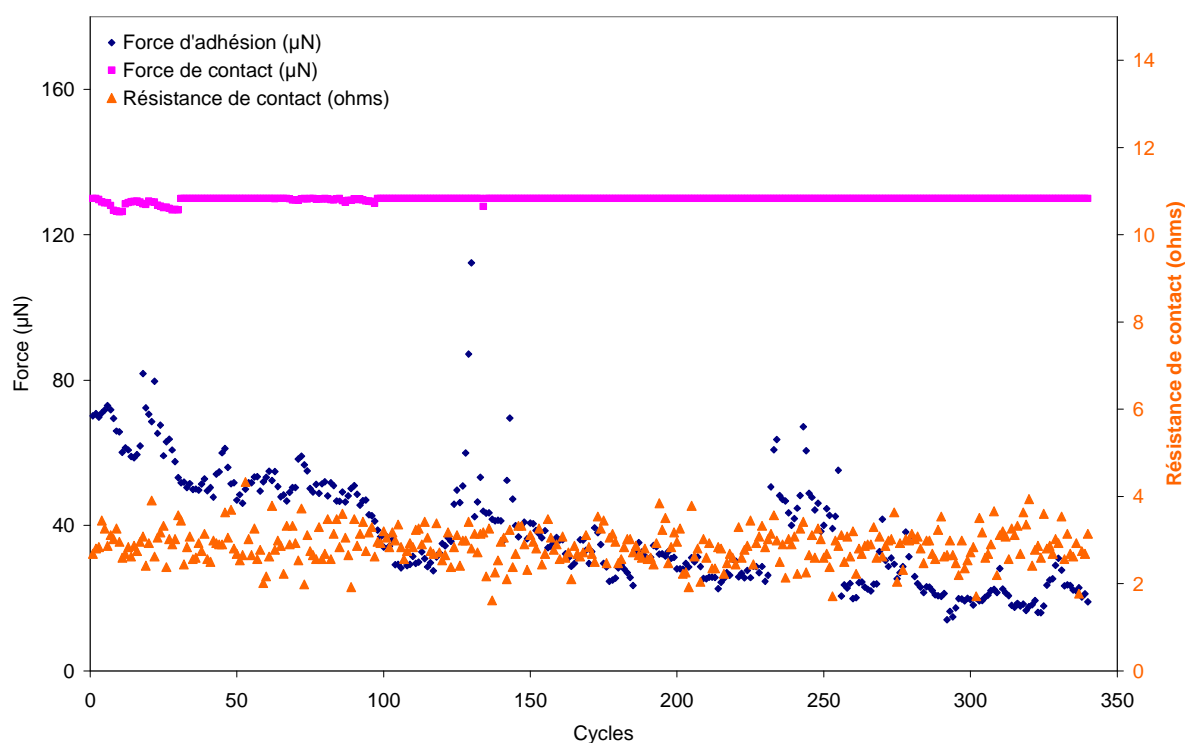


Figure 114. Evolution de la résistance de contact et des forces d'adhésion et de contact en fonction du nombre de cycles effectués.

Nous remarquons que la déflexion du levier est trop élevée pour le détecteur laser, la force de contact saturant à $130\mu\text{N}$. Une force de contact légèrement plus faible sera donc fixée pour les prochains tests. La résistance de contact reste stable, entre 2 et $4\ \Omega$, tout au long des 350 cycles tandis que la force d'adhésion diminue progressivement, traduisant une modification des surfaces de contact. Une observation au microscope électronique à balayage (MEB) de l'extrémité du levier AFM après cyclage permet d'obtenir des informations supplémentaires sur ce point (cf. Figure 115).

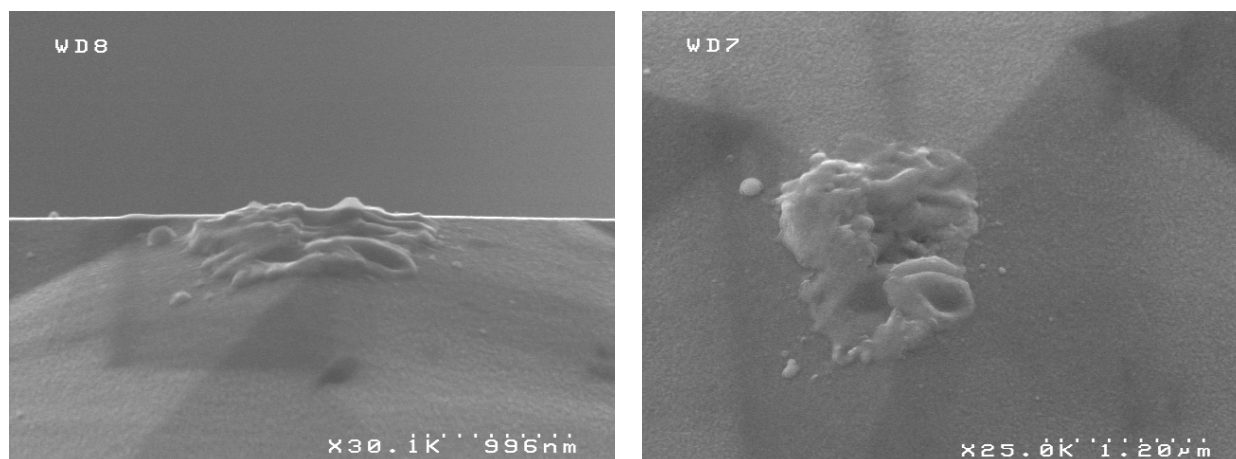


Figure 115. Observation MEB du levier AFM (cathode) à l'issue des cyclages.

Sur ces clichés l'extrémité du levier AFM de forme pyramidale caractéristique est bien visible. Nous remarquons que globalement de la matière supplémentaire est apparue au sommet de cette pyramide, à l'emplacement de la zone de contact avec le substrat. De la matière a donc été déposée sur la cathode, provenant probablement de la partie opposée du contact, l'anode. Malheureusement il est très difficile de retrouver la zone de contact correspondante sur le substrat, le défaut étant bien trop petit vis-à-vis de la zone à explorer. Cependant cette première observation laisse bien penser qu'un transfert de matière orienté de l'anode vers la cathode se produit.

4.2.2. Levier AFM polarisé positivement (anode)

La même série de tests a été effectuée en inversant la polarité, le levier étant polarisé positivement cette fois-ci. La même procédure de test est utilisée, mais avec une force légèrement plus faible et les mêmes résultats sont extraits du cyclage. La Figure 116 présente l'évolution de la résistance en fonction du nombre de cycles ainsi que l'évolution de la force de contact maximale et de la force d'adhésion.

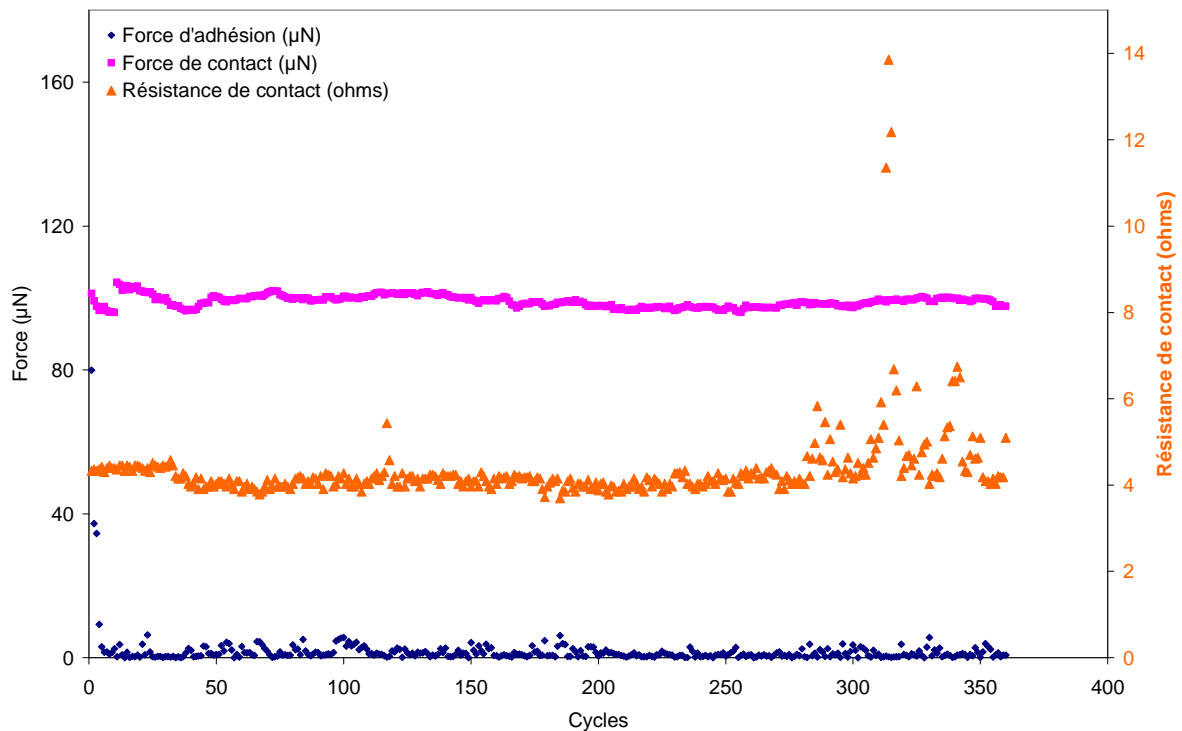


Figure 116. Evolution de la résistance de contact et des forces d'adhésion et de contact en fonction du nombre de cycles effectués.

Pour ce test la force de contact maximale a été fixée à $110\mu\text{N}$ et elle reste stable au cours du cyclage. La force d'adhésion chute très rapidement, en moins de 5 cycles à quelques micro-newtons, ce qui traduit une modification importante des surfaces de contact. La résistance de contact, quant à elle, reste stable aux environs de 4Ω pendant les 300 premiers cycles et atteint ensuite par intermittence des valeurs allant jusqu'à 15Ω . Une dégradation importante des surfaces de contact est donc à attendre, ce que vont confirmer les clichés MEB effectués sur le levier (cf. Figure 117).

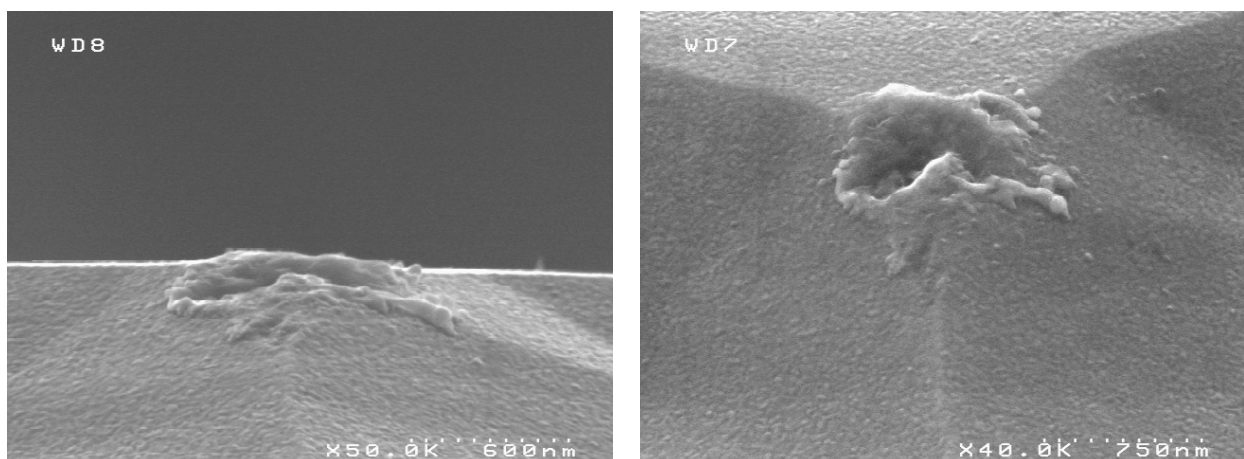


Figure 117. Observation MEB de la zone de contact sur le levier AFM (anode) à l'issue des cyclages.

Sur ces clichés nous remarquons encore la forme pyramidale caractéristique de l'extrémité des leviers. Dans ce cas, le sommet de cette pyramide a été érodé, creusant un cratère dans le matériau de contact. Le cratère est peut-être assez profond pour que la sous-couche de nickel soit découverte par endroits, ce qui expliquerait les augmentations de résistance observés lors du cyclage. Cependant le plus intéressant est de constater que dans cette polarité le levier (anode) est érodé au cours du cyclage, la matière enlevée allant vraisemblablement se déposer sur le contact opposé (cathode).

Cette série de tests permet donc de mettre en évidence un transfert de matière directionnel, orienté de l'anode vers la cathode lors du cyclage du micro-contact sous 5V/1mA. Ce comportement est identique à celui observé sur le micro-interrupteur (cf. figure 1 en début de chapitre). Le banc de test développé est donc représentatif d'un micro-interrupteur et permet de reproduire des transferts de matière qui semblent similaires à ceux que nous souhaitons étudier. La vitesse d'apparition des dégradations est accélérée, en seulement 300 cycles nous arrivons à observer des transferts de matière qui nécessitent des dizaines de milliers de cycles sur le micro-interrupteur. Nous allons maintenant utiliser le banc pour étudier précisément les phases de commutation à vitesse très réduite.

5. Etude de la phase de fermeture du contact

Pour étudier précisément les phases de commutation du micro-contact expérimental, le circuit de mesure associé au banc de test est légèrement modifié (cf. Figure 118). Un ampèremètre est ajouté en série avec le micro-contact tandis qu'un voltmètre est branché en parallèle. Le même appareil de mesure est utilisé pour ces deux mesures, il s'agit d'un Keithley 2602A possédant deux voies de mesure indépendantes.

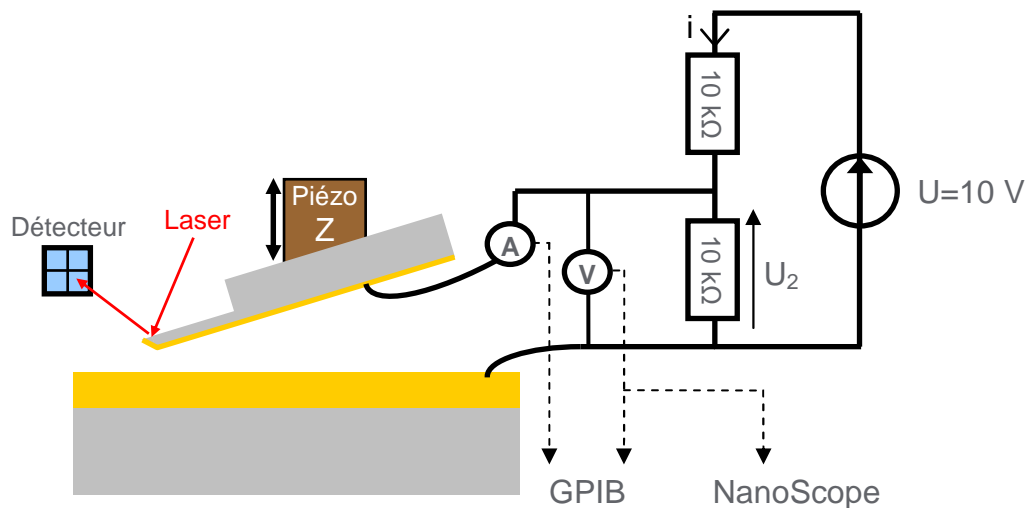


Figure 118. Modification du circuit d'acquisition du micro-contact expérimental.

L'acquisition des données se fait de deux façons simultanées. Les données récoltées par le Keithley 2602A sont enregistrées grâce au logiciel LabTracer 2.0 fourni par Keithley et une interface GPIB ad hoc. Le temps d'intégration d'une telle mesure est réglé pour que la mesure soit la plus rapide possible, à savoir 200µs. Pour pouvoir synchroniser ces

mesures avec le mouvement du levier AFM, la tension aux bornes du contact est aussi redirigée vers le numériseur de l'AFM, comme pour les tests précédents. Ainsi, la superposition des deux tensions, l'une mesurée par le Keithley et la seconde mesurée par le Nanoscope, permet d'obtenir une synchronisation parfaite entre le mouvement du levier, la tension aux bornes du micro-contact et le courant circulant au travers.

Cette partie de l'étude vise à observer les phénomènes électriques se produisant durant les phases de commutation, et pour ce faire le micro-contact est actionné à des vitesses réduites grâce à l'actionneur piézoélectrique vertical de l'AFM. Cette vitesse de commutation peut être réglée de 6 nm/s jusqu'à plusieurs $\mu\text{m/s}$. Dans notre cas nous travaillons principalement avec des vitesses très réduites : 6 nm/s et 30 nm/s. Les deux polarités étudiées précédemment sont explorées, ainsi que les trois matériaux de contact: Au, Ru et W (en tant que contact fixe).

5.1. Mise en évidence d'une émission électronique par effet de champ

5.1.1. Mesures sur le banc de test

Pour tester le système d'acquisition de données, nous procédons dans un premier temps à l'enchaînement de quelques cycles à une vitesse de commutation de 60 nm/s, toujours sous air. Durant ces cycles, la tension aux bornes du contact est enregistrée de deux façons différentes, comme nous l'avons vu précédemment. Une acquisition est synchronisée avec le mouvement du levier tandis que la seconde est synchronisée avec la mesure de courant. Cette double mesure permet de tracer simultanément les valeurs ainsi mesurées, comme le présente la Figure 119 suivante.

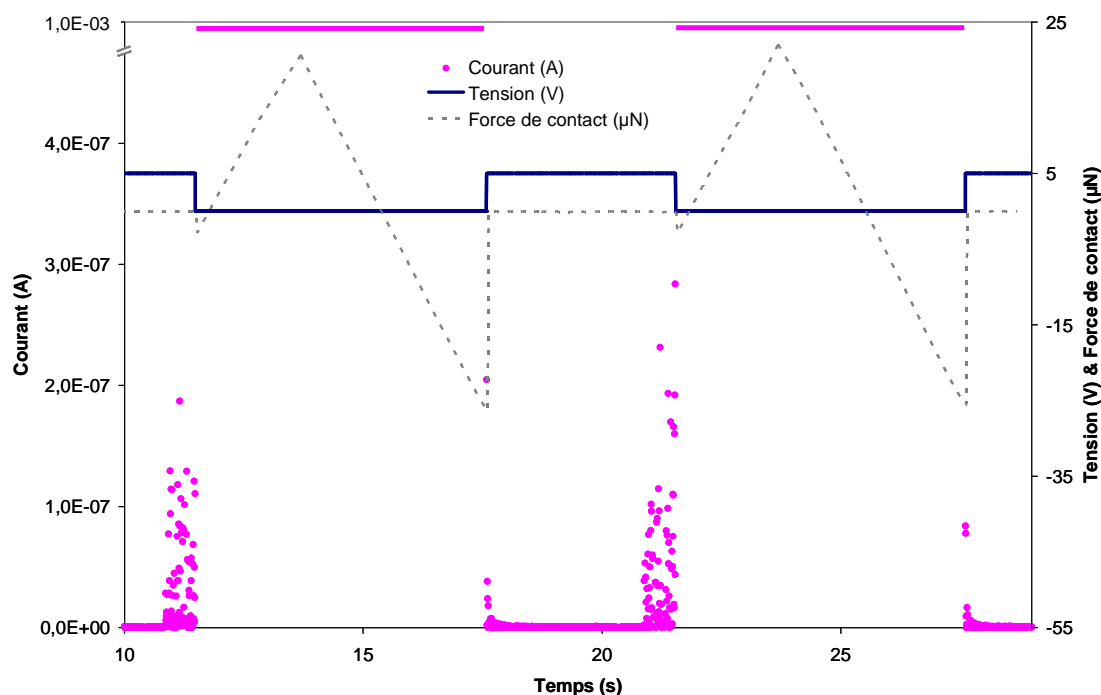


Figure 119. Acquisitions simultanées du courant circulant dans le micro-contact, de la tension à ses bornes et de la force de contact lors de l'enchaînement de plusieurs cycles de commutations.

Le mouvement du levier est similaire à ce que nous avons pu observer précédemment, les mêmes phases remarquables sont observables. La tension aux bornes du micro-contact coïncide avec le mouvement du levier AFM. Ainsi, lorsque le levier est éloigné de la surface ($F_{\text{contact}} = 0$), la tension est de 5V (circuit ouvert) et dès que le levier entre en contact avec la surface la tension chute à une valeur très proche de 0V (quelques mV).

Cette mesure montre que la fermeture mécanique du contact et la commutation électrique sont parfaitement synchronisées, et il en est de même pour la réouverture du contact. Cependant en examinant précisément la mesure du courant circulant au travers du contact, nous remarquons que du courant est mesurable une demi-seconde avant que le contact ne se ferme. Les valeurs de courant sont faibles (quelques dixièmes de μA) mais ne sont clairement pas dues au bruit de la mesure. Le micro-contact se ferme à une vitesse de 60 nm/s, ce passage de courant se produit donc environ 30nm avant la fermeture mécanique du contact. Pour procéder à un examen plus détaillé de ces derniers instants avant la fermeture du contact, des commutations à la vitesse de 6 nm/s sont réalisées, un résultat typique des mesures de tension et courant est présenté en Figure 120.

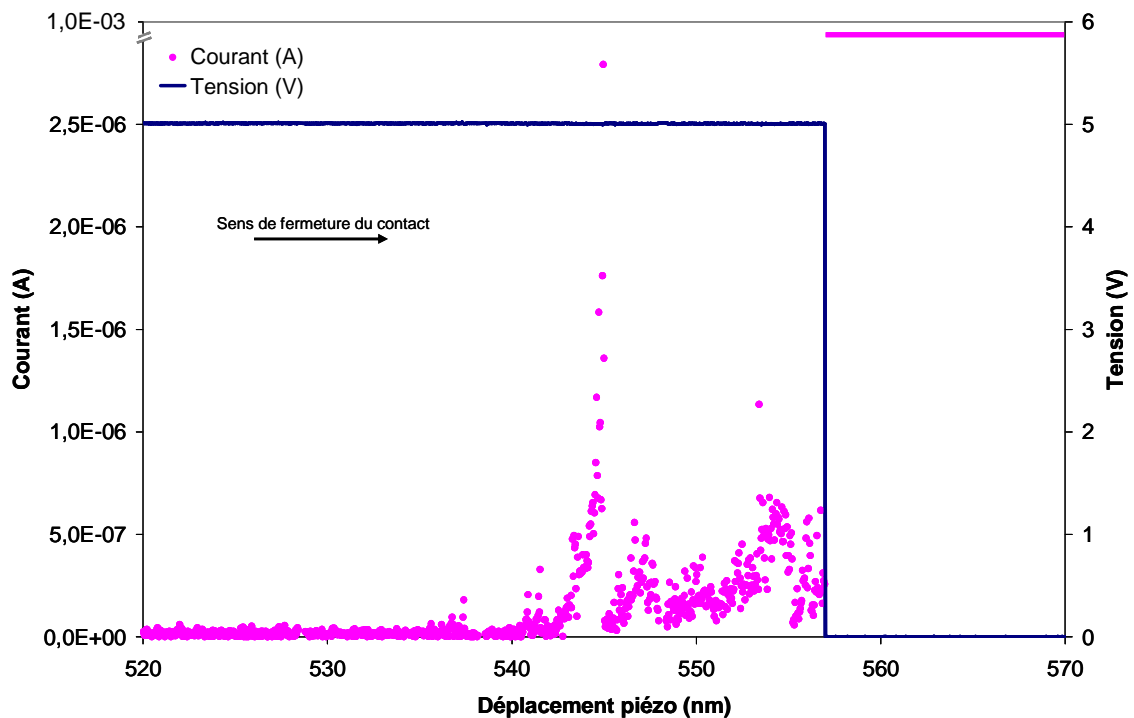


Figure 120. Détail des derniers instants précédant la fermeture du micro-contact.

Nous remarquons qu'effectivement, 20nm avant que le contact ne se ferme ($U \sim 0\text{V}$ et $I \sim 1\text{mA}$), du courant circule au travers du contact, avec des valeurs allant jusqu'à $2\mu\text{A}$. Nous avons mis en évidence précédemment -et nous nous sommes assurés que c'était encore le cas ici- que les fermetures mécanique et électrique du contact étaient parfaitement synchronisées. Le courant circulant dans le contact 20nm avant la fermeture est donc probablement émis depuis la cathode (source des électrons) et atteint l'anode en traversant la faible distance inter-contacts présente.

5.1.2. Validation des mesures à l'oscilloscope

La mesure effectuée grâce au Keithley 2602A n'a pas un taux d'échantillonnage élevé malgré l'utilisation de la meilleure vitesse disponible. Une mesure à l'oscilloscope s'impose donc pour vérifier que nous ne passons pas à côté de phénomènes très brefs. Les courants à mesurer sont au maximum de l'ordre du microampère, nous effectuons donc notre mesure aux bornes d'une résistance de $1\text{ M}\Omega$ placée en série avec le contact. Le résultat de cette mesure est présenté sur la Figure 121-b tandis que la Figure 121-a présente la même mesure effectuée avec le Keithley 2602A. Les mesures ne sont pas effectuées en même temps toutefois, il s'agit de deux commutations différentes.

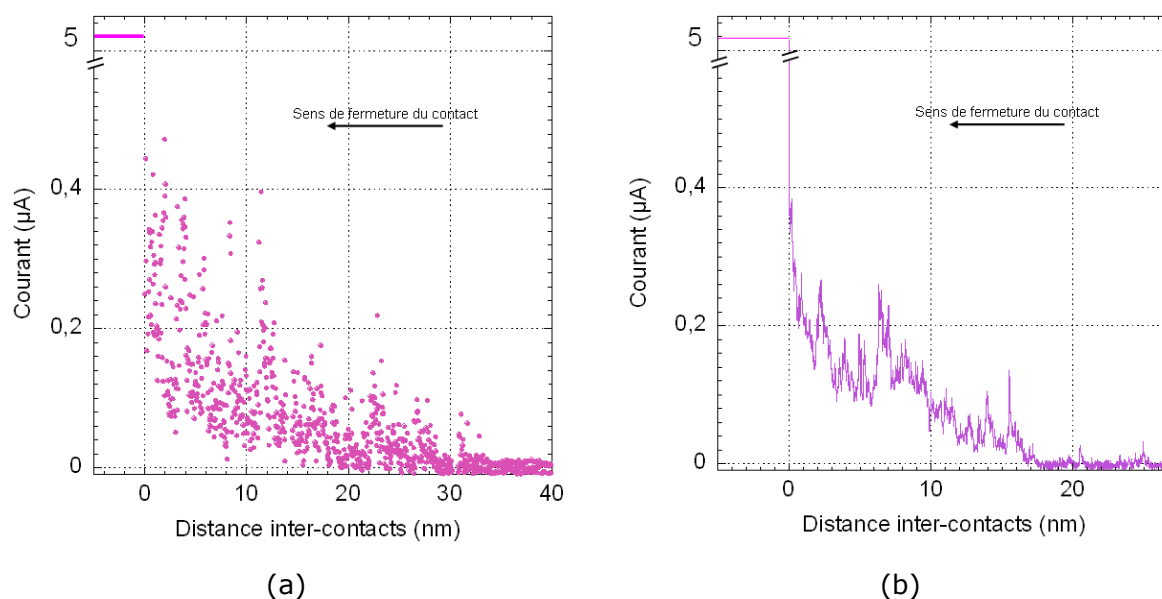


Figure 121. Comparaison entre la mesure du courant au Keithley 2602A (a) et à l'oscilloscope (b).

Les deux méthodes de mesure donnent des résultats similaires. La mesure au Keithley est moins résolue, certes, mais aucun évènement intense n'échappe pour autant. La mesure mise en place, basée sur l'utilisation du Keithley 2602A est donc satisfaisante pour les tests effectués et nous conserverons cette méthode de mesure qui présente l'avantage de permettre une acquisition aisée par port GPIB.

La même mesure à l'oscilloscope est effectuée sans rajouter la résistance de $1\text{ M}\Omega$ utilisée. La mesure est alors effectuée directement aux bornes de la résistance de charge R_1 de $10\text{ k}\Omega$. Avec ce principe de mesure, aucun signal ne peut être détecté. Le bruit de la mesure est de 15 mV , donc si aucun signal ne se distingue de ce bruit ceci signifie qu'aucun courant supérieur à $1.5\text{ }\mu\text{A}$ ($I=15\text{ mV}/10\text{ k}\Omega$) n'est émis avant la fermeture du contact. Cette observation révèle que le courant total pouvant circuler dans le contact n'exerce aucune influence sur le phénomène d'émission observé. L'examen du phénomène physique à l'origine de cette émission de courant va nous le confirmer.

5.1.3. Théorie

Plusieurs phénomènes peuvent être à l'origine du passage d'un courant juste avant la fermeture du contact : (a) l'émission thermoïonique, (b) l'émission par effet Schottky ou

émission thermoïonique assistée par effet de champ et (c) l'effet tunnel, qui dans notre cas particulier est appelé émission électronique par effet de champ ou émission Fowler-Nordheim.

Extraire un électron d'un métal en contact avec l'air nécessite de franchir une barrière énergétique qui est la différence entre le niveau de Fermi du métal et le niveau du vide ; cette énergie est appelée travail de sortie (Φ sur la Figure 122-a). A température nulle, les électrons d'un métal sont répartis jusqu'à un niveau d'énergie maximal appelé niveau de Fermi. Cependant si le métal est excité thermiquement, les électrons gagnent une énergie suffisante pour quitter ce niveau de Fermi. Si cette énergie est supérieure au travail de sortie du métal, les électrons peuvent quitter le matériau : il s'agit de l'émission thermoïonique. Si l'électrode métallique est polarisée négativement, la barrière de potentiel entre le métal et le vide est réduite et les électrons ont alors besoin de moins d'énergie thermique pour quitter le métal, c'est l'effet Schottky.

Enfin, si le champ appliqué est très intense (quelques V/nm), la barrière de potentiel est considérablement abaissée et amincie et les électrons peuvent alors passer directement du niveau de Fermi vers le vide, même sans aucune excitation thermique. Il s'agit de l'effet tunnel, conséquence directe de la physique quantique qui nous apprend qu'un électron se comporte comme une onde et que sa probabilité de présence n'est pas strictement nulle de l'autre côté d'une barrière de potentiel très fine [Fursey2005]. Ainsi plus le champ est intense, plus la barrière est fine et abaissée et donc plus la probabilité qu'un électron traverse la barrière est élevée. Le passage d'électrons par effet tunnel d'un solide métallique vers le milieu extérieur est appelé *Fowler-Nordheim Tunneling*, du nom des deux physiciens ayant mis en équation ce phénomène dans les années 1920 [Fowler1928].

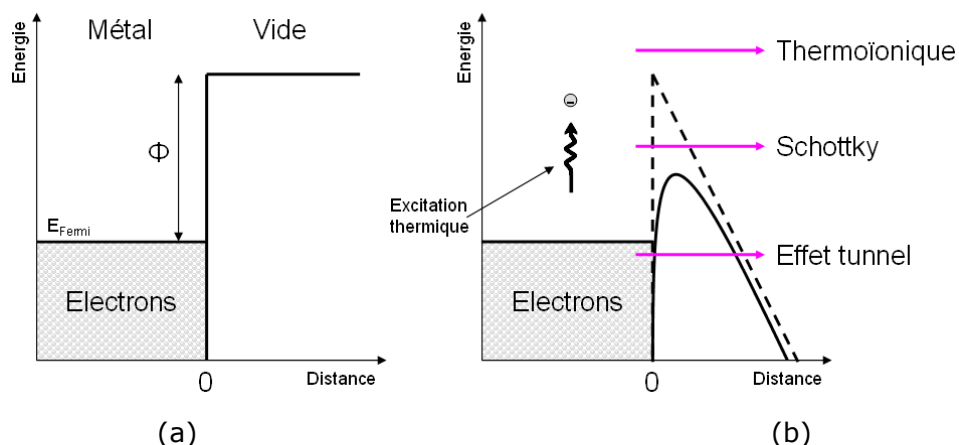


Figure 122. Illustration des différents phénomènes d'émission électronique depuis une électrode métallique. (a) Electrode au repos en contact avec l'air. (b) Effet de la polarisation et phénomènes d'émission électronique possibles.

Dans notre cas le contact est mécaniquement ouvert au moment où commence l'émission électronique et donc aucune excitation thermique (par effet Joule) du matériau n'est donc possible. Les phénomènes d'émission thermoïonique et Schottky sont donc exclus, mais le mécanisme d'émission électronique par effet de champ Fowler-Nordheim a une forte probabilité de se produire. En effet, la différence de potentiel entre nos deux électrodes est assez faible (5V) mais la distance inter-électrodes est réduite (20-30 nm).

Ceci engendre un champ inter-électrodes très intense : quelques 10^8 V/m, mais encore insuffisant pour générer de l'émission électronique Fowler-Nordheim : 3.10^9 V/m sont nécessaires pour l'or.

Cette valeur de champ est cependant valable pour des surfaces strictement planes, or nous savons qu'une surface est toujours rugueuse. Ce sont ces rugosités qui, par effet de pointe, vont être les zones préférentielles d'émission électronique. En effet, un champ $E = 10^8$ V/m règne globalement entre les deux électrodes, mais au niveau d'une rugosité, le champ local est égal à $E_{\text{local}} = \beta.E$ où β est un facteur géométrique lié à la forme de la rugosité (cf. Figure 123). Ce coefficient β n'est jamais égal à 1 : un matériau de contact pour l'appareillage de coupure sous vide présente un β initial de l'ordre de 1000, par exemple. (Des étapes de conditionnement des surfaces, visant à diminuer cette valeur de β sont alors nécessaires).

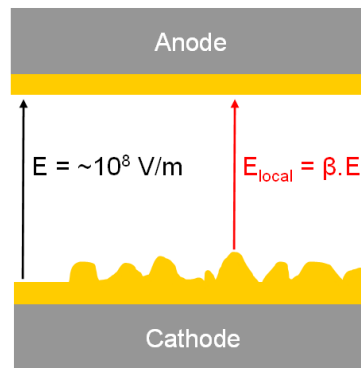


Figure 123. Illustration de l'amplification locale du champ électrique par un facteur β : effet de pointe.

Il apparaît donc très probable que les conditions soient réunies pour que l'émission électronique que nous observons soit une émission Fowler-Nordheim. Une telle émission est régie par la formule homonyme, permettant de calculer le courant émis (i en A) en fonction du champ (E en V/m) appliqué, du facteur d'amplification (β) et du travail de sortie du métal de la cathode (Φ en eV) :

$$i = S.A.(\beta.E)^2 \cdot \exp\left(-\frac{B.v(y).\Phi^{\frac{3}{2}}}{\beta.E}\right) \quad (4.1)$$

avec S la surface d'émission en m^2 et

$$\begin{cases} A = \frac{1.54 \times 10^{-6}}{\Phi.t^2(y)} \\ B = 6.83 \times 10^9 \end{cases} \quad (4.2, 4.3)$$

$v(y)$ et $t(y)$ sont deux fonctions tabulées dépendantes de y et qui peuvent être approximées par des polynômes, valables dans la gamme 2.10^8 V/m < E < 5.10^9 V/m, par [Zeitoun1991]:

$$\begin{cases} t(y) \approx 1 \\ v(y) \approx 0.956 - 1.062.y^2 \end{cases} \quad (4.4, 4.5)$$

$$\text{avec } y = 3.795 \times 10^{-5} \times \left(\frac{(\beta.E)^{\frac{1}{2}}}{\Phi} \right) \text{ (sans dimension)} \quad (4.6)$$

Un tel phénomène est alors tracé dans un système de coordonnées particulier, le système Fowler-Nordheim, qui consiste à tracer $\ln\left(\frac{i}{E^2}\right)$ en fonction de $\frac{1}{E}$. En se reportant à l'équation (4.1) nous pouvons aisément comprendre qu'une telle courbe est en fait une droite de pente négative. Ce comportement est caractéristique d'une émission Fowler-Nordheim et nous allons maintenant rechercher si le phénomène que nous observons obéit à une telle loi.

Avant de procéder à ces investigations, considérons plus en détails le système auquel nous avons affaire. Le levier se rapproche progressivement du substrat et une tension constante de 5V est appliquée entre ces deux surfaces métalliques. Considérons dans cet exemple que le substrat est polarisé négativement, il va donc être la source d'électrons. A mesure que les deux surfaces se rapprochent le champ entre les deux électrodes augmente progressivement. Les rugosités, quant à elles, développent un champ local augmentant progressivement aussi, mais dont l'intensité est multipliée par le facteur β (cf. Figure 123). Lorsque le champ local est suffisant au niveau de la rugosité présentant le β le plus élevé, l'émission commence au niveau de cette rugosité. Ensuite, plus les électrodes se rapprochent, plus le nombre de rugosités susceptibles d'émettre augmente. La Figure 124 illustre ce scénario.

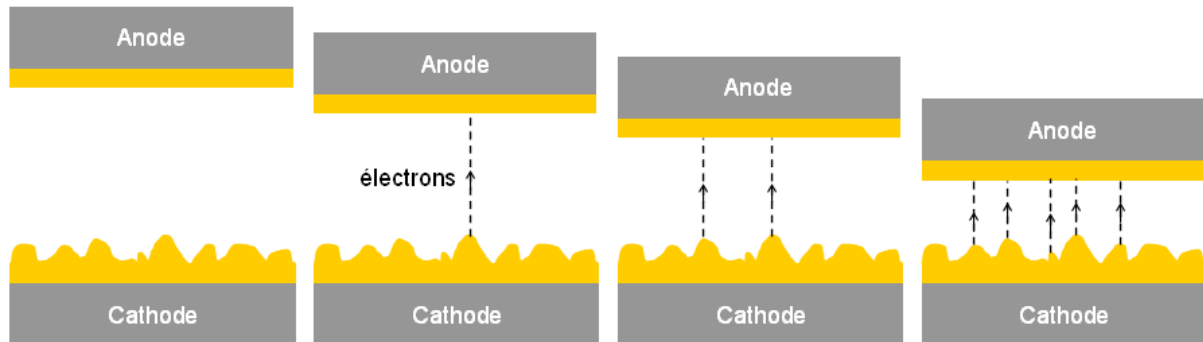


Figure 124. Evolution du nombre de sites émissifs avec la réduction progressive de la distance inter-électrodes.

En examinant les mesures obtenues sur la Figure 120 à la lumière de ce scénario d'émission, nous comprenons alors que les mesures effectuées sont une superposition d'émissions, chacune provenant d'une rugosité différente. Tracer en coordonnées Fowler-Nordheim l'ensemble des données de la Figure 120 se révélerait donc infructueux ou tout du moins insuffisant. Cependant nous pouvons remarquer que certaines émissions sortent du lot, en particulier lorsque la distance inter-électrodes est encore assez

importante (20nm) et que très peu de rugosités, voire une seule, peuvent émettre des électrons. Ainsi l'émission électronique la plus remarquable dans la Figure 120 est celle débutant à 542nm (15nm avant la fermeture du contact). Ainsi, en traçant cette émission remarquable en coordonnées Fowler-Nordheim, nous obtenons le graphe présenté en Figure 125.

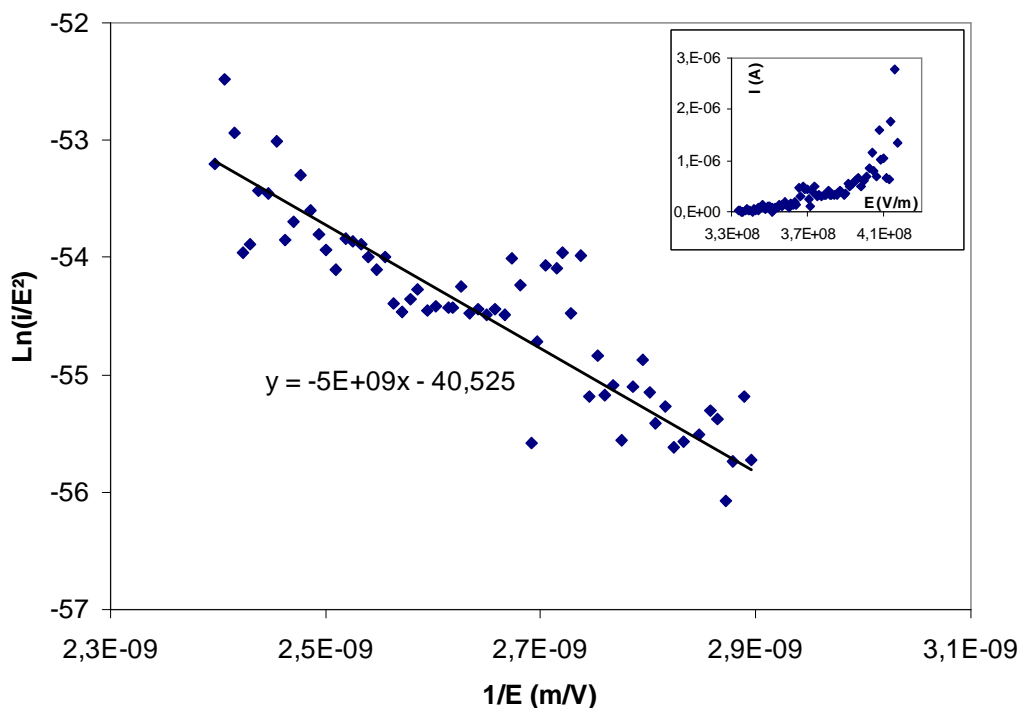
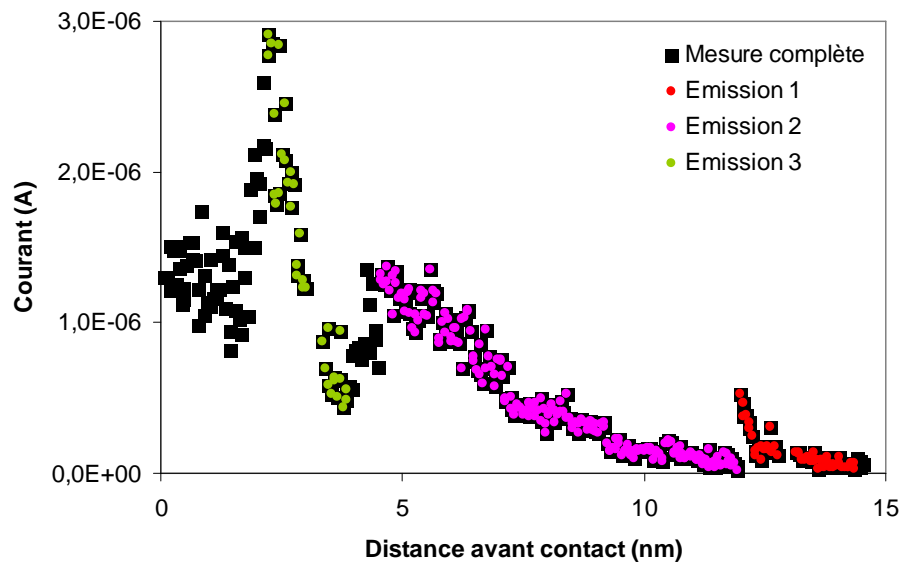


Figure 125. Tracé en coordonnées Fowler-Nordheim du phénomène d'émission électronique observé précédemment (indiqué en insert).

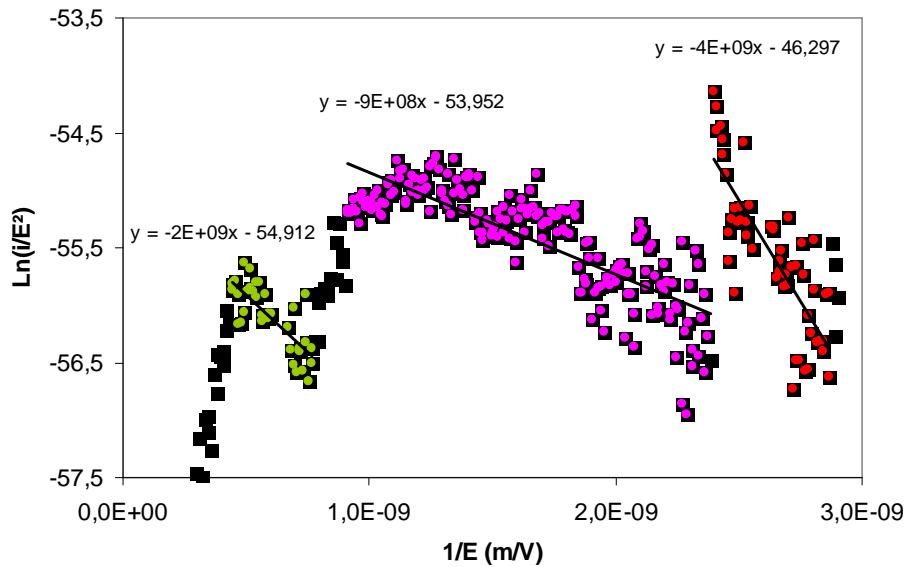
Cet ensemble de points de mesures peut être ajusté par une droite de pente négative, caractéristique d'une émission électronique Fowler-Nordheim. Cette observation, parfaitement reproductible lors des dizaines de mesures effectuées avec nos électrodes recouvertes d'or, confirme que le courant mesuré plusieurs dizaines de nanomètres avant la fermeture du contact est émis au travers de l'espace inter-électrodes par émission électronique par effet de champ (effet Fowler-Nordheim). Nous allons voir dans le paragraphe suivant, et par la suite, que ces observations se répètent systématiquement.

5.2. Comparaison des matériaux

En procédant aux mêmes tests avec les substrats recouverts de ruthénium et de tungstène polarisés négativement (cathode), nous observons les mêmes comportements. Tracés en coordonnées Fowler-Nordheim, les émissions remarquables présentent toutes des pentes négatives. Le tungstène, en particulier, présente des émissions très bien définies et plus intenses que l'or. La décomposition d'une mesure complète en trois émissions élémentaires est ainsi présentée sur la Figure 126 ainsi que le tracé en coordonnées Fowler-Nordheim correspondant.



(a)



(b)

Figure 126. (a) Décomposition d'une mesure de courant émis depuis un substrat recouvert de tungstène en plusieurs émissions élémentaires. (b) Tracés en coordonnées Fowler-Nordheim correspondants.

Les émissions remarquables identifiées, tracées dans le système de coordonnées appropriées, sont toutes ajustables par des droites de pente négative. Ceci renforce l'hypothèse que le courant mesuré est lié à de l'émission Fowler-Nordheim. Les trois matériaux testés se comportent toutefois légèrement différemment. Sur la Figure 127 sont tracées côte à côte des mesures de courant typiques effectuées sur les trois matériaux Au, Ru et W.

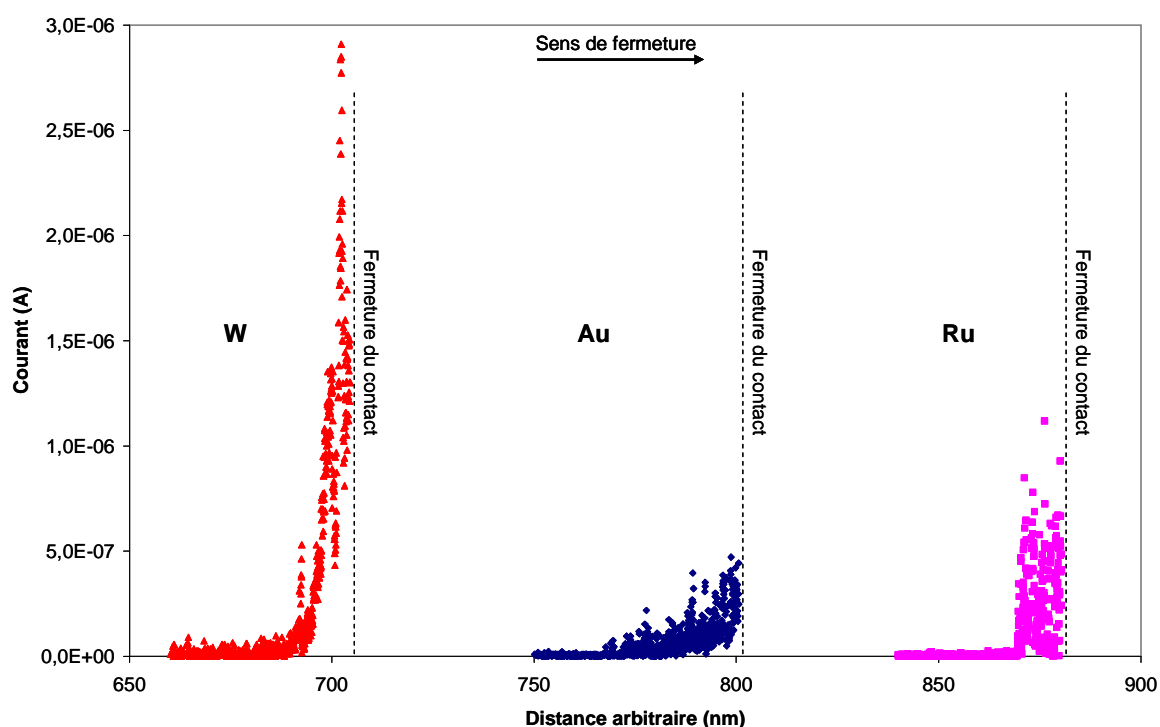


Figure 127. Comparaison des émissions obtenues sur les trois matériaux testés.

Nous remarquons, que même si le phénomène est le même pour les trois matériaux, leurs comportements sont bien différents. Nos échantillons d'or et de tungstène émettent à des distances inter-contacts plus élevées que le ruthénium mais le ruthénium émet des courants plus élevés que l'or mais moins élevés que le tungstène. Ces trois comportements différents sont résumés sur la Figure 128, une dizaine d'émissions pour chaque matériau ayant été considérées pour obtenir ces valeurs moyennes. Sur cette figure le champ minimal d'émission présenté correspond à la différence de potentiel (5V) divisée par la distance inter-électrodes à partir de laquelle l'émission débute.

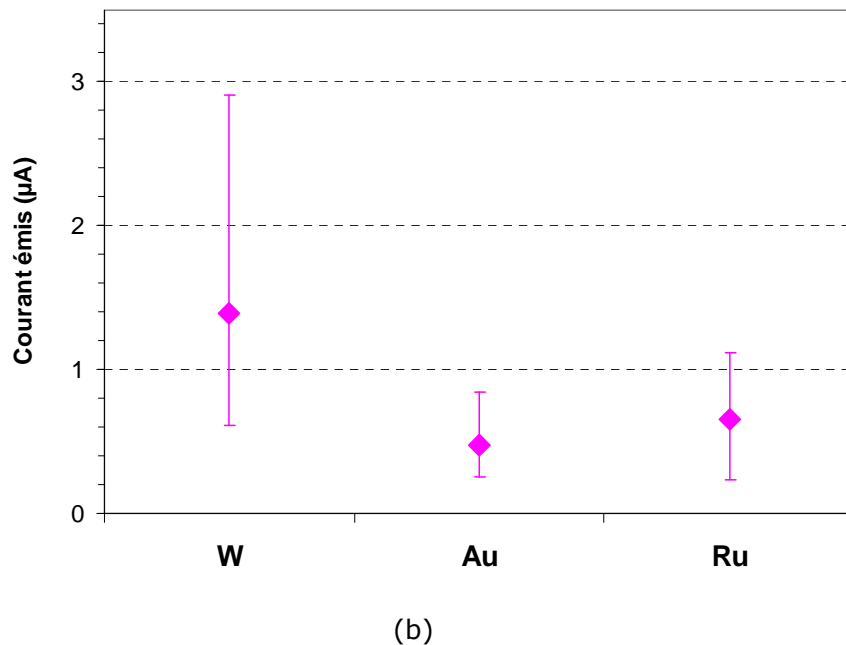
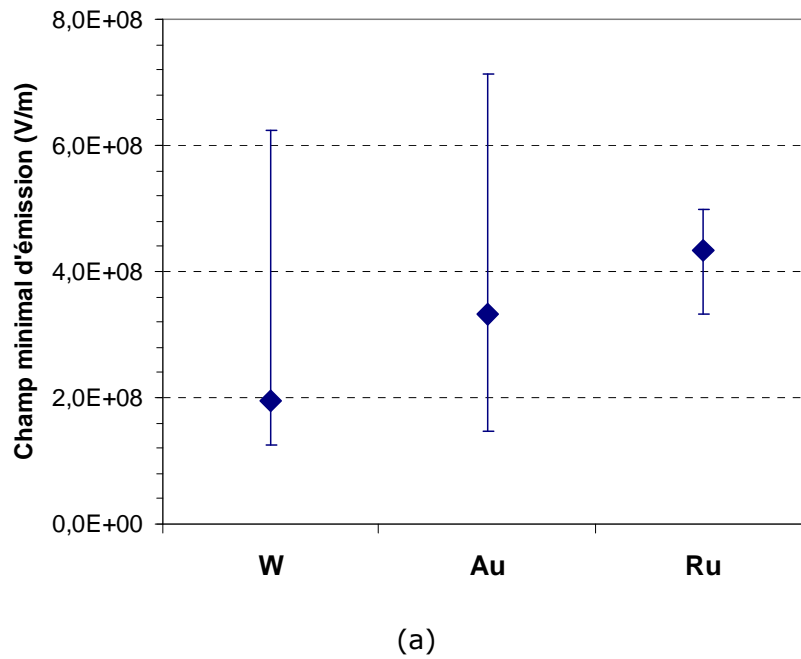


Figure 128. Comparaison des trois matériaux. (a) Champ minimal d'émission. (b) Intensité du courant émis.

Le champ minimal d'émission est, pour les trois matériaux, inférieur au champ minimal théorique qui est de $2,5 \cdot 10^9$ V/m pour le tungstène, $3 \cdot 10^9$ pour l'or et $2,75 \cdot 10^9$ V/m pour le ruthénium. Comme nous l'avons vu précédemment ce champ théorique ne tient pas compte du facteur d'amplification local du champ (β). De plus son calcul, basé sur un tracé de la densité de courant émise en fonction du champ grâce à la formule (4.1), considère un travail de sortie du matériau théorique. Or il est connu que le travail de sortie d'un métal dépend énormément de son état de surface. En particulier la présence d'oxydes sur les surfaces fait chuter ce travail de sortie. La présence de contamination ou d'humidité modifie aussi sa valeur, mais il est difficile de prédire son comportement [Leung2003].

Nous avons alors procédé à des mesures des travaux de sortie de nos matériaux par KFM (*Kelvin Force Microscopy*). L'intérêt de cette mesure réside dans le fait que le travail de sortie peut être obtenu dans les mêmes conditions que les tests que nous avons effectués, aucune préparation de surface sous ultra-vide n'étant nécessaire comme c'est le cas en spectroscopie d'émission photoélectrique (méthode classiquement utilisée pour déterminer les travaux de sortie théoriques des matériaux). Nous avons donc procédé à la mesure des travaux de sortie de nos échantillons d'or, de ruthénium et de tungstène et les résultats sont présentés dans le Tableau 21 ci-dessous.

Matériau	W	Au	Ru
Φ théorique (eV)	4.55	5.1	4.71
Φ mesuré (eV)	4.2 ± 0.1	4.7 ± 0.1	4.6 ± 0.05

Tableau 21. Travaux de sortie théoriques et mesurés par KFM des matériaux utilisés.

Nous remarquons que les travaux de sortie mesurés sont tous inférieurs aux valeurs théoriques. La présence d'oxyde pour le tungstène et le ruthénium est très probable, et la présence de contamination sur tous les matériaux est fort probable aussi, aucun soin particulier n'ayant été pris pour le nettoyage des surfaces. Nous allons maintenant utiliser ces valeurs mesurées pour déterminer le facteur d'amplification du champ (β) de nos matériaux.

Le tracé que nous avons effectué précédemment de $Ln\left(\frac{i}{E^2}\right)$ en fonction de $\frac{1}{E}$ nous a permis de mettre en évidence une émission électronique Fowler-Nordheim. Cependant les pentes négatives des droites obtenues ont une signification physique. En effet, en examinant l'équation (4.1) nous pouvons facilement remarquer que la pente d'une telle droite est égale à $\frac{B.v(y).\phi^{\frac{3}{2}}}{\beta}$. En remplaçant $v(y)$ par l'approximation (4.5) et y par sa valeur, nous trouvons que la pente de la droite est égale à :

$$pente = \frac{6.53 \times 10^9 \cdot \phi^{\frac{3}{2}}}{\beta} \quad (4.7)$$

Ainsi, connaissant le travail de sortie de nos matériaux et la pente des droites de chaque émission remarquable tracée en coordonnées Fowler-Nordheim, nous sommes capables de calculer un facteur d'amplification du champ (β) moyen pour chacun de nos matériaux. Les valeurs ainsi obtenues sont illustrées par la Figure 129 ci-dessous.

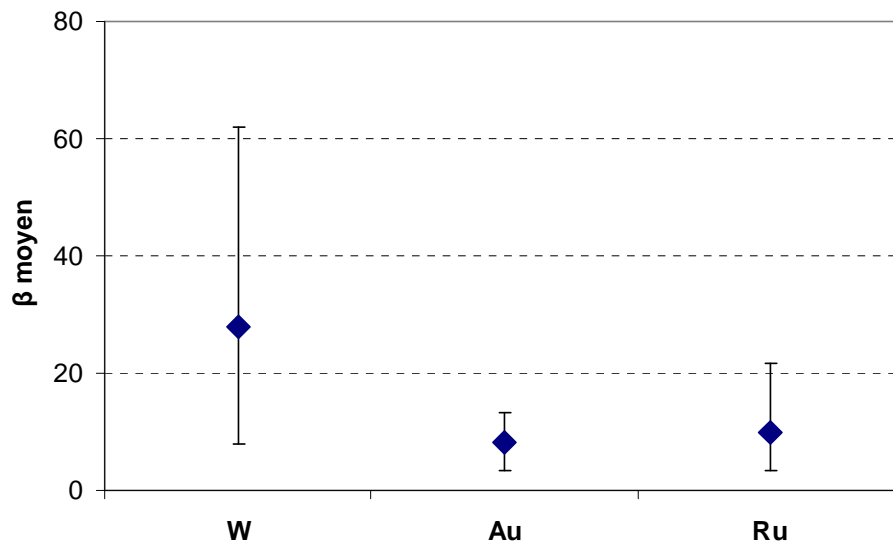


Figure 129. Extraction du coefficient β pour chacun des matériaux.

Les valeurs du facteur d'amplification moyen du champ pour l'or et le ruthénium sont très proches, de l'ordre de 10 tandis que le facteur β pour le tungstène est aux alentours de 30. Ce facteur est représentatif de l'état de surface de la cathode, et étant donné qu'aucune structuration (plots, lignes) n'est présente sur nos surfaces, ce β est représentatif de la rugosité de nos matériaux. Des mesures de rugosité ont alors été effectuées à l'AFM sur les trois matériaux, dans le but de chercher une corrélation avec les valeurs de β ainsi calculées (cf. Tableau 22).

Nous pouvons toutefois remarquer que le β trouvé est très inférieur aux valeurs habituellement constatées dans des contacts macroscopiques. En effet, comme nous l'avons déjà énoncé, un matériau utilisé dans des applications de commutation sous vide présente un β d'environ 1000. Pour assurer une meilleure tenue diélectrique des séquences de rodage sont effectuées dans le but de supprimer les aspérités responsables de ce β élevé [CraigMiller1965]. Si ce conditionnement est efficace, une valeur de β irréductible de 100 est obtenue [Picot2000]. Les valeurs que nous obtenons sont inférieures à cette valeur limite, mais la qualité des matériaux et des procédés de dépôt utilisés en microélectronique permet aisément de comprendre que les états de surface que nous avons sont bien meilleurs que ceux obtenus en technologie classique.

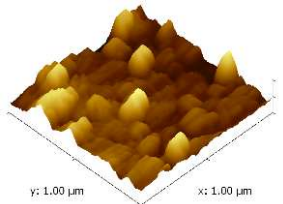
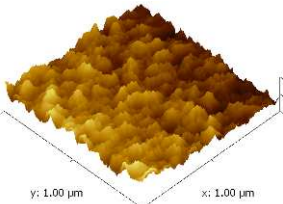
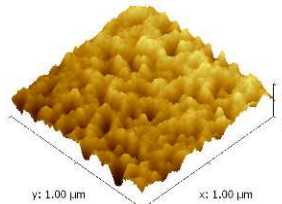
	Tungstène	Or	Ruthénium
Rugosité RMS (nm)	3.97	1.25	1.86
Rugosité Max (nm)	29.88	16.14	16.08
Image AFM 1x1 μm^2			

Tableau 22. Mesures de rugosité effectuées sur chacun des substrats utilisés.

Estimer le facteur d'amplification de champ d'une surface à partir de sa rugosité est une approche couramment utilisée, mais qui s'avère malheureusement souvent infructueuse à nos échelles. Il faudrait réaliser un réel travail de modélisation et d'analyse des surfaces pour retrouver les valeurs de β que nous avons estimées d'après les tracés précédents. Nous pouvons cependant remarquer que l'or et le ruthénium présentaient des valeurs de β similaires et que leurs rugosités sont effectivement très proches. Le tungstène présente un β plus élevé et sa rugosité est en effet plus importante. Le facteur β de nos échantillons semble donc bien représentatif à leur topographie.

5.3. Influence de l'atmosphère

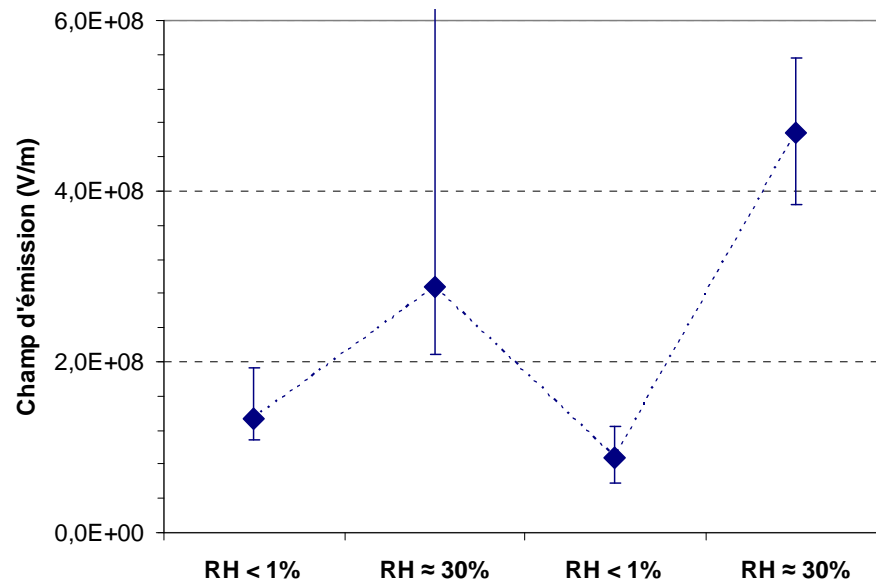
Les tests précédents ont tous été effectués sous atmosphère ambiante, avec un taux d'humidité moyen de 30%. Dans ces conditions, une ou quelques monocouches d'eau sont présentes sur les surfaces d'or [Freund1999, Gil2000], ce qui peut avoir des effets inattendus sur l'émission électronique observée. De plus, l'humidité est une cause de défaillance majeure dans les microsystèmes, et lors du packaging des dispositifs il est toujours pris grand soin d'éviter la présence d'eau à l'intérieur de la cavité scellée. Un micro-interrupteur opère donc le plus souvent dans une atmosphère dépourvue d'humidité et il convient donc de tester notre micro-contact expérimental dans une telle atmosphère.

L'AFM est équipé d'un caisson étanche pouvant être purgé sous azote qui permet de procéder à ces tests. Le caisson n'est pas hermétique, il a été conçu dans le but de pouvoir fonctionner sous atmosphère contrôlée et le flux d'azote permet d'assécher l'atmosphère et donc partiellement les surfaces. Une purge de plusieurs heures permet de descendre à un taux d'humidité relatif (RH) inférieur à 1%. Nous procédons alors à une série de tests successifs présentée dans le Tableau 23 ci-dessous.

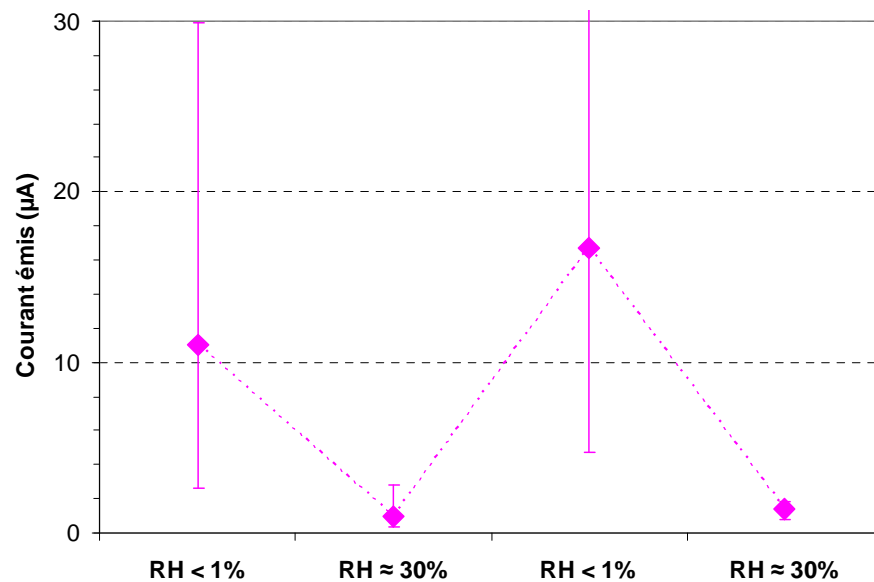
N° test	Conditions atmosphériques	Conditions de test
1	RH < 1%	5 cycles consécutifs à 30 nm/s
2	RH \approx 30 %	Coupure 5V/1mA
3	RH < 1%	Cathode : levier AFM
4	RH \approx 30 %	Substrat : Au

Tableau 23. Séquence de test effectuée pour étudier l'influence de l'humidité.

Tous les tests sont effectués dans les mêmes conditions, avec le même levier AFM et le même substrat recouvert d'or que précédemment. L'enchaînement croisé d'essais réalisés sous deux types d'environnement différents permet de s'assurer de la reproductibilité de la mesure. Le résultat de cette série de mesures est présenté en Figure 130. Le champ minimal d'émission est déterminé comme précédemment en divisant la tension appliquée (5V) par la distance inter-contacts à partir de laquelle l'émission débute.



(a)



(b)

Figure 130. Comparaison de l'émission électronique en fonction du taux d'humidité. (a) Champ minimal d'émission. (b) Intensité du courant émis.

Nous remarquons clairement que l'atmosphère exerce une influence sur le phénomène d'émission Fowler-Nordheim. Ainsi, lorsque l'atmosphère est dépourvue d'humidité l'émission débute pour des champs plus faibles que lorsque l'atmosphère est humide

(1.10^8 V/m contre 4.10^8 V/m) et l'émission est 10 à 20 fois plus intense. La présence d'eau sur les surfaces d'or semble donc être bénéfique et limite l'émission électronique (cf. Figure 131).

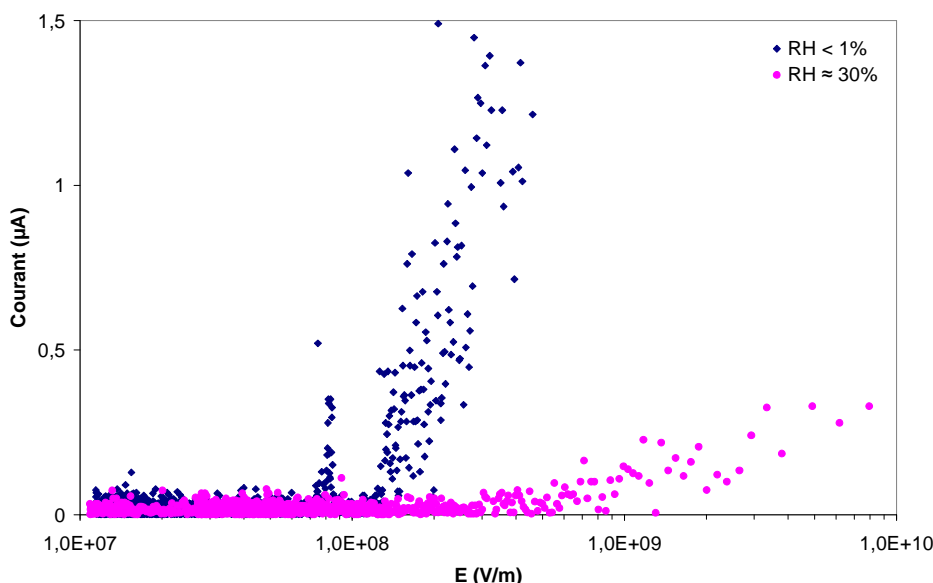


Figure 131. Comparaison des émissions électroniques à humidité réduite et ambiante pour deux émissions représentatives de chaque atmosphère ($E=U/gap$).

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer un tel phénomène. La première qui vient à l'esprit est un changement du travail de sortie de la cathode. Nous avons en effet explicité précédemment que le travail de sortie d'un matériau était très dépendant de son état de surface. L'adsorption d'eau sur la surface de la cathode, et les éventuelles impuretés piégées dans ce film d'eau peuvent modifier le travail de sortie du matériau.

En procédant par KFM à des mesures du travail de sortie en air sec et en air ambiant, l'or présent sur notre levier AFM ne révèle aucune différence. La mesure par KFM est une mesure indirecte, nous mesurons en effet une différence de travail de sortie entre la pointe utilisée pour la mesure et le substrat (l'or). Or cette pointe de mesure (recouverte de PtIr) adsorbe aussi de l'eau, ce qui peut masquer alors la modification du travail de sortie que nous souhaitons mesurer. Si le travail de sortie a changé, nous sommes malheureusement incapables de quantifier cette variation dans notre cas.

Cependant, l'adsorption de molécules sur la cathode peut modifier le phénomène d'émission électronique, sans pour autant modifier le travail de sortie [Duke1967, Zeitoun1991]. La présence d'un atome sur la surface d'émission modifie la géométrie de la barrière de potentiel entre la cathode et le vide, et l'émission se fait alors au travers de cet atome, par résonance. En fonction de la nature des atomes adsorbés, l'émission électronique peut être accrue ou au contraire réduite. Ce phénomène a pour effet de modifier la surface effective d'émission (cf. Figure 132), paramètre que l'on retrouve noté S dans l'équation (4.1). Cette surface apparente n'est pas une valeur strictement géométrique représentant la surface d'un site émissif en particulier, elle correspond à la surface où le champ électrique est approximativement constant.

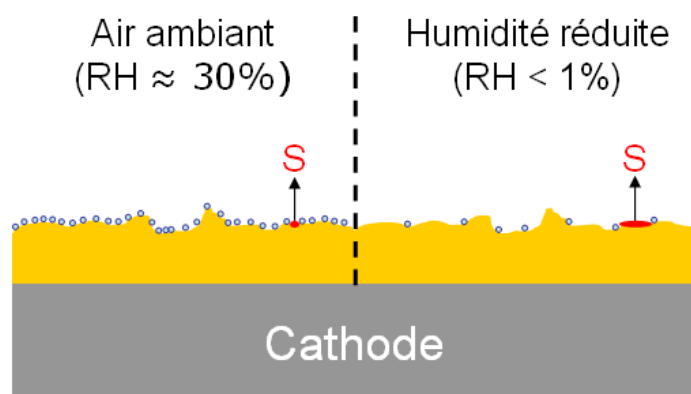


Figure 132. Evolution de la surface d'émission en fonction de l'humidité.

Cette réduction de la surface apparente d'émission est un phénomène connu et documenté [Zeitoun1991] et qui est technologiquement important, la présence de certains gaz résiduels pouvant dégrader la tenue diélectrique de l'appareillage électrique sous vide. Dans un tel cas de figure le coefficient β ne varie pas (ou très peu), le relief de la cathode n'étant pas modifié. De la même façon que pour évaluer β , le tracé en coordonnées Fowler-Nordheim permet d'évaluer aussi cette surface S d'émission. Ainsi, en combinant l'équation (4.1) et les approximations polynomiales (4.4, 4.5) il est possible de calculer que l'ordonnée à l'origine de la droite caractéristique de l'émission électronique est égale à :

$$Y_0 = \ln(S) - \ln(\phi) + 2.\ln(\beta) + 10,42.\phi^{-0,5} - 13,38 \quad (4.8)$$

En connaissant le coefficient β correspondant à notre surface et son travail de sortie nous pouvons alors calculer S . Dans les tests que nous venons d'effectuer, le levier AFM était la cathode, ce sont donc les paramètres β et ϕ de l'or déposé sur le levier qu'il faut prendre en compte. En procédant comme précédemment nous obtenons les valeurs indiquées dans le Tableau 24 suivant.

Travail de sortie Φ (en eV)	4.5 ± 0.1
Facteur d'amplification β	30 ± 8
Rugosité RMS (nm)	0.98
Rugosité max (nm)	8.31

Tableau 24. Propriétés de l'or déposé sur les leviers AFM.

Cependant, comme nous l'avons vu précédemment le levier AFM est de forme pyramidale. Une telle géométrie est susceptible d'amplifier le champ par effet de pointe. Pour nous assurer que tel n'est pas le cas, nous procédons au relevé du profil de ce levier grâce à un AFM équipé d'une pointe nanométrique. Ce profil permet ensuite de reproduire la géométrie exacte du levier et simuler le facteur d'amplification d'une telle géométrie grâce au logiciel de simulation par éléments finis *FEMM*. Le résultat de cette simulation nous fournit une valeur pour le coefficient β d'environ 1.5. L'amplification du champ calculée précédemment (environ 30) est donc bien principalement liée à la rugosité de la surface d'or et non pas à la forme pyramidale du levier.

Nous procédons alors à l'évaluation de la surface émissive S avec les valeurs que nous avons mesurées. Nous trouvons que le diamètre de la surface émissive lorsque les tests sont effectués à RH ambiant est de 3nm. Par contre, lorsque les tests sont effectués sous humidité réduite, cette valeur est multipliée par 1000 tandis que la valeur de β reste constante. L'émission électronique accrue observée lorsque l'humidité ambiante est réduite peut donc être attribuée à la désorption des molécules d'eau de la surface, engendrant des surfaces émissives plus importantes.

5.4. Influence de la vitesse d'actionnement

Tous les tests précédents ont été effectués à vitesse ultra-réduite, allant de 6 nm/s à 30 nm/s. Il convient donc de se poser la question de savoir si dans les conditions de fonctionnement d'un micro-interrupteur de tels phénomènes ont le temps de se produire ou pas. Pour vérifier cela expérimentalement, nous avons procédé à une centaine de cycles à une vitesse 100 fois supérieure aux tests précédents les plus lents : 600 nm/s. De plus, cette série de tests a été effectuée dans les conditions les plus proches d'un micro-interrupteur, à savoir sous atmosphère dépourvue d'humidité (RH < 1%). Le détail de trois cycles successifs est décrit par la Figure 133.

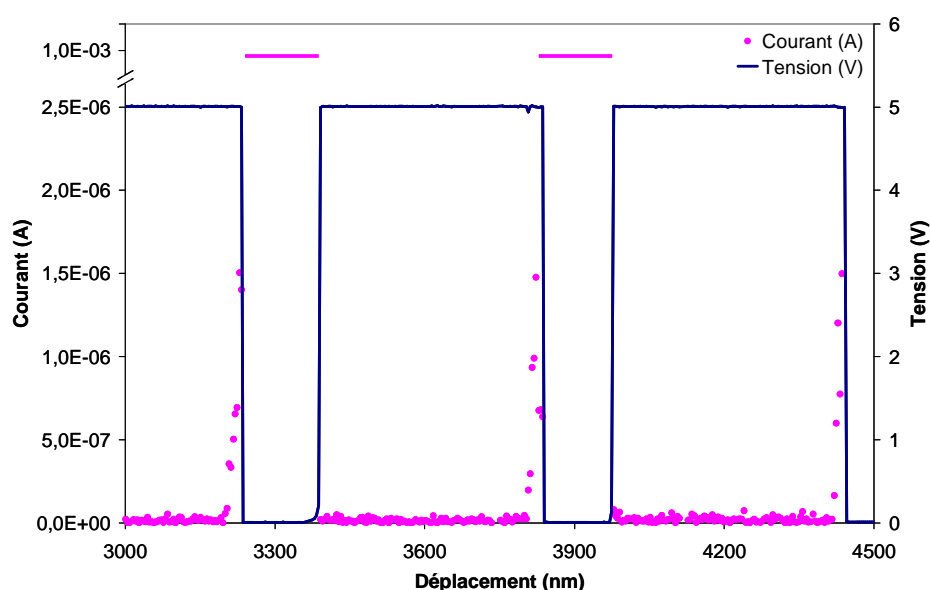


Figure 133. Visualisation d'émission électronique lors d'actionnements rapides sous humidité réduite.

Durant les tests précédents, la distance inter-électrodes à partir de laquelle l'émission électronique avait lieu était d'environ 35nm pour l'or dans ces conditions d'atmosphère et les courants atteints de plusieurs μA . Nous nous apercevons que lorsque la vitesse de commutation est multipliée par 100, les résultats sont identiques : la distance moyenne d'émission est de 30nm et les courants atteints sont de plusieurs μA . Il n'est pas étonnant que ces valeurs soient indépendantes de la vitesse d'actionnement. En effet, l'émission Fowler-Nordheim est un effet tunnel particulier, et donc un phénomène quasi instantané (quelques femtosecondes [Sekatskii2001]).

Ainsi, même si la vitesse d'actionnement est 10^4 fois supérieure, comme c'est le cas pour le micro-interrupteur, le phénomène d'émission électronique mis en évidence se produit et atteint des courants aussi élevés. Seul le temps total pendant lequel se produit le phénomène change, ce temps étant directement proportionnel à la dérivée du champ électrique et donc à la vitesse de commutation.

5.5. Phénomènes anodiques

Nous avons pour l'instant mis en évidence que lors de la fermeture d'un micro-contact sous une tension continue de 5V, des électrons sont émis depuis la cathode par effet Fowler-Nordheim. Nous avons mesuré que cette émission électronique se produit dès que la distance inter-contacts est inférieure à 20nm environ ($E > 2,5 \cdot 10^8$ V/m). Nous avons de plus montré que cette émission est régie par l'état de surface de la cathode. L'anode ne joue aucun rôle dans ce phénomène, mais nous allons voir qu'elle joue un rôle important dans le mécanisme de transfert de matière.

Les électrons émis, lorsqu'ils quittent la cathode sont accélérés par le champ électrique régnant dans l'espace-inter-électrodes, leur permettant d'acquérir une énergie cinétique égale à :

$$W = q \cdot V = 5eV \quad (4.9)$$

Le libre parcours moyen des électrons dans l'air à pression atmosphérique est d'environ 0.5 μm . Aucune interaction entre les électrons émis et le milieu gazeux inter-contacts n'est donc envisageable. Ceci explique les similitudes que nous observons entre notre micro-contact et le domaine de la commutation sous vide. Ce faisceau d'électrons a tendance à s'élargir durant son trajet de la cathode vers l'anode, les électrons ayant tendance à se repousser les uns les autres. Il est possible de calculer l'élargissement du faisceau électronique lors de son arrivée sur l'anode (cf. Figure 134).

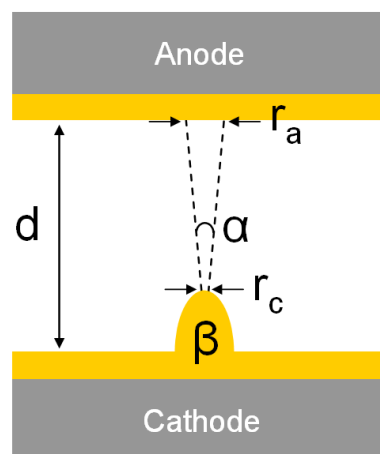


Figure 134. Paramètres géométriques entrant en compte dans le calcul de l'élargissement du faisceau d'électrons.

Le rayon du faisceau d'électrons lors de son impact sur l'anode (r_a) située à une distance d de la cathode peut se calculer ainsi :

$$r_a = \sqrt{\beta \cdot d \cdot r_c \cdot \sin(\alpha)} \quad (4.10)$$

Où β est le facteur d'amplification du champ dont nous avons déjà parlé, r_c le rayon émissif du site dont nous avons déjà explicité le calcul et α l'angle d'ouverture du faisceau. Plus les électrodes sont espacées, plus ce faisceau s'élargit. L'angle d'ouverture est un paramètre difficile à estimer sans connaître la géométrie exacte du site émissif. Dans notre cas, la distance inter-contacts est extrêmement réduite, nous pouvons donc considérer que le faisceau ne s'élargit pas considérablement. Nous avons calculé précédemment que le diamètre de la surface émissive pour l'or était de 3nm, nous estimons alors le diamètre du faisceau électronique lors de son impact sur l'anode à environ 5nm.

Les courants émis mesurés précédemment sont de l'ordre du micro-ampère, ce qui représente environ 6.10^{12} électrons par seconde. Nous avons donc 6.10^{12} électrons, possédant chacun une énergie de 5eV qui vont impacter une surface anodique de 5 nm de diamètre. Ceci représente une densité d'énergie égale à :

$$E_{anode} \approx \frac{6.10^{12} \times 5 \times 1.6.10^{-19}}{\pi.(2.5.10^{-9})^2} \approx 10^{11} W / m^2$$

Notons que dans notre cas le contact est en mouvement, la distance inter-électrodes diminue donc progressivement. Ceci entraîne une augmentation progressive du courant émis, comme nous l'avons vu précédemment. A ce phénomène vient se rajouter probablement une focalisation du faisceau électronique accrue à mesure que la distance diminue. Tout ceci engendre une densité énergétique de plus en plus importante sur l'anode, probablement bien plus importante que l'ordre de grandeur que nous venons de calculer.

Calculer l'élévation de température au niveau de l'anode générée par ce flux électronique n'est donc pas trivial, de nombreux paramètres entrant en jeu. Si nous considérons le cas simple d'un solide semi-infini initialement à température ambiante et soumis à un flux constant F_0 (W/m²), nous pouvons estimer sa température surfacique (en x=0) de la façon suivante [Carslaw1959] :

$$T(x=0) = \frac{2.F_0}{K} \left(\frac{K.t}{\pi.\rho.c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

Où K est la conductivité thermique du matériau, ρ sa densité et c sa chaleur spécifique, trois paramètres que nous considérons indépendants de la température. Le résultat de cette estimation de la température anodique pour les trois matériaux utilisés est présenté sur la Figure 135 suivante. Une telle estimation est bien entendu valable uniquement si le matériau ne change pas de phase.

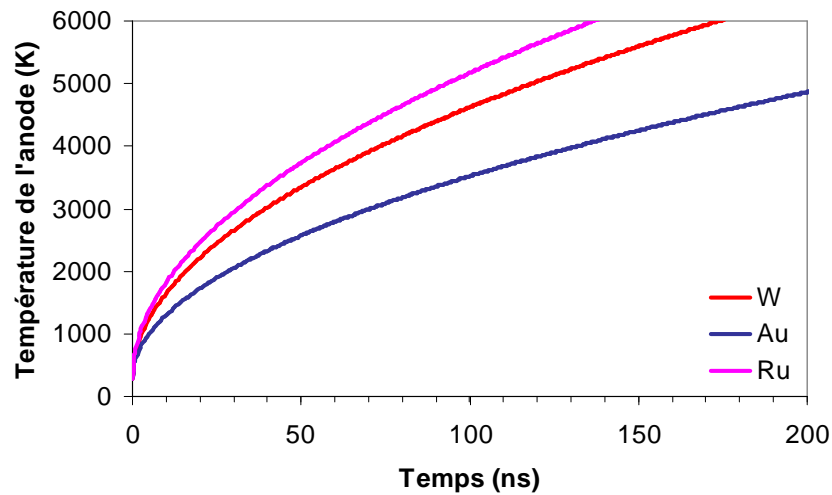


Figure 135. Evaluation de l'échauffement anodique pour les différents matériaux testés.

Nous remarquons qu'en quelques dizaines de nanosecondes seulement, quel que soit le matériau présente sur l'anode, la température locale atteint plusieurs milliers de degrés, bien supérieure à la température de fusion de n'importe quel matériau. Pour cette estimation, nous avons considéré que pour les trois matériaux le même flux électronique venait impacter l'anode. Nous avons cependant vu précédemment que les trois matériaux présentaient des comportements différents, le tungstène émettant beaucoup facilement des électrons que les deux autres matériaux. En utilisant les mesures effectuées précédemment et en procédant à une intégration du courant émis en fonction du temps, nous pouvons estimer le nombre d'électrons impactant l'anode pour chacun des matériaux. En utilisant alors ces valeurs énergétiques pour procéder à notre estimation de température anodique, nous obtenons les résultats présentés sur la Figure 136 ci-dessous.

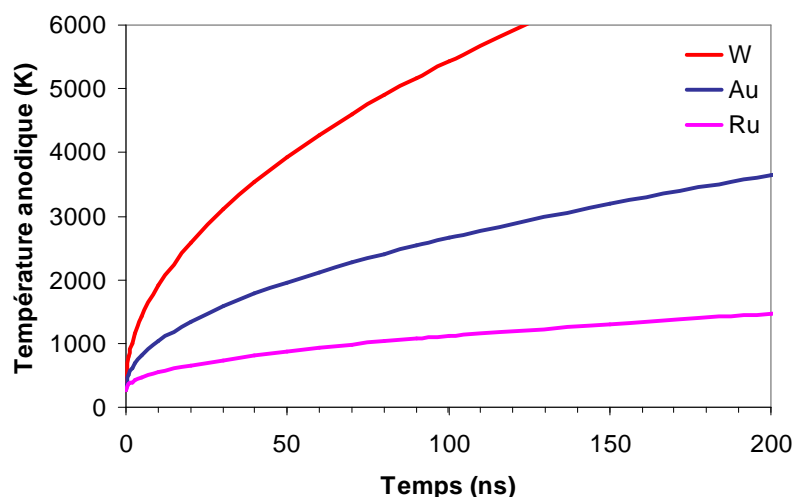


Figure 136. Evaluation de l'échauffement anodique dans le cas d'un contact symétrique.

Cette nouvelle estimation représente le cas d'un contact symétrique, où le matériau émetteur d'électrons (cathode) est de la même nature que le matériau qui subit ce

bombardement électronique et s'échauffe en conséquence (anode). Ce cas de figure est plus proche de la réalité que de considérer un contact dissymétrique. Nous constatons alors qu'un contact tungstène/tungstène n'est pas optimal, sa propension à émettre des électrons facilement et sa mauvaise dissipation thermique le pénalisent fortement. Un contact ruthénium/ruthénium semble le mieux adapté.

Pour confirmer ces estimations, nous procédons à une série de tests grâce à notre micro-contact expérimental. Le levier AFM, toujours recouvert d'or est polarisé positivement, il joue donc le rôle d'anode tandis que le substrat recouvert d'or joue le rôle de cathode, émetteur d'électrons. Nous procédons alors à une centaine d'actionnements du micro-contact. Ces actionnements ont cependant une particularité, ils sont réalisés en polarisant le contact uniquement durant les phases de fermeture. Durant les phases d'ouverture, la tension n'est pas appliquée grâce à un commutateur monté en parallèle du contact (chronogramme en Figure 137). Grâce à ce protocole de test nous étudions ainsi uniquement la phase de fermeture du contact sous courant, phase durant laquelle nous avons mis en évidence de l'émission électronique.

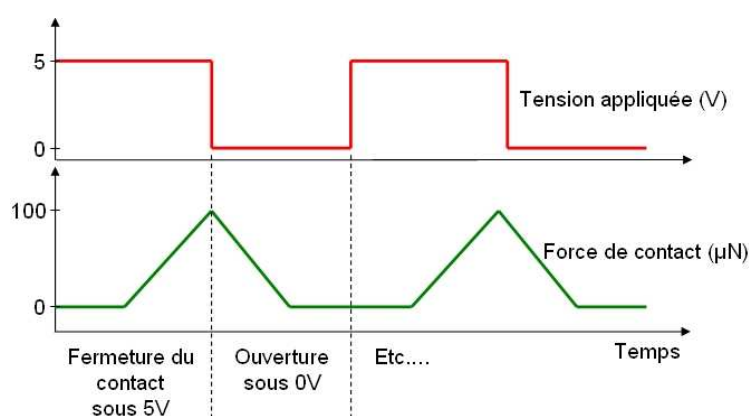


Figure 137. Chronogramme des essais permettant d'étudier uniquement la phase de fermeture du contact.

Le levier étant l'anode, il va recevoir le flux électronique en provenance de la cathode. Le fait de procéder uniquement à des fermetures sous courant nous permet d'observer les conséquences de ce bombardement électronique sur l'anode, sans rajouter les éventuels phénomènes liés à la phase d'ouverture sous courant. L'observation de l'état du levier après cette centaine de cycles permet de vérifier les estimations de température auxquelles nous venons de procéder. La Figure 138 suivante présente des clichés MEB d'un levier AFM après une centaine de fermetures sous 5V/1mA.

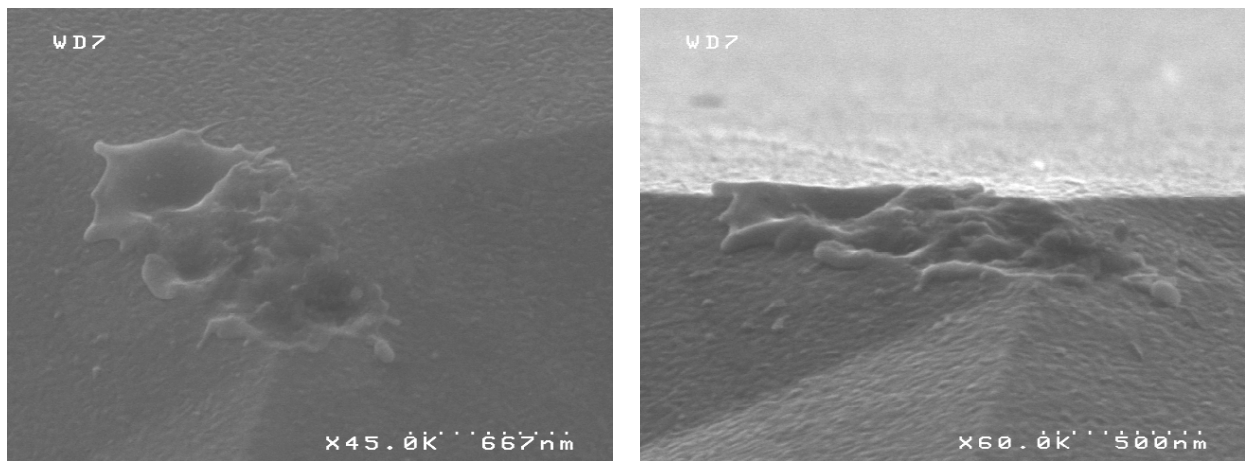


Figure 138. Observation MEB du levier AFM (anode) à l'issue de 100 fermetures sous courant (5V/1mA).

Nous constatons qu'à l'issue des cycles le matériau de l'anode a effectivement fondu en surface. Les zones fondues semblent traduire l'impact du faisceau électronique, formant plusieurs petits cratères fondus. Ce résultat amène en partie la preuve que sous l'impact du faisceau électronique émis par la cathode, le matériau de l'anode entre en fusion. Ce test a été réalisé sur l'or, mais le même test a été effectué sur le tungstène, qui possède une température de fusion trois fois plus élevée que l'or et le résultat est le même, voire pire, la Figure 139 en atteste.

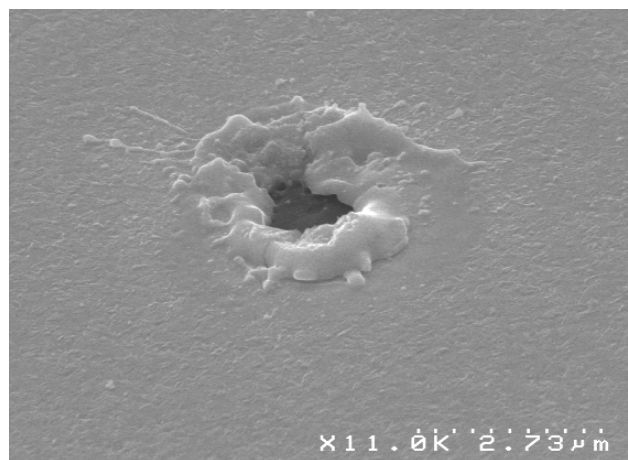


Figure 139. Observation MEB du substrat recouvert de tungstène à l'issue de 100 cycles de commutation sous courant (5V/1mA).

Le tungstène possède une température de fusion trois fois plus élevée que l'or (3680K contre 1337K). Cependant sa conductivité thermique (K) est deux fois plus faible (174 W/m.K contre 317 W/m.K), il dissipe donc moins bien la chaleur, ce qui entraîne un échauffement local plus important que pour l'or, à densité de puissance incidente égale.

Les estimations de température présentées en Figure 135 et Figure 136 le prévoyaient déjà, avant que le test ne soit effectué²⁰.

Nous avons montré que les électrons émis par la cathode ont pour effet de chauffer localement la zone d'impact anodique. La théorie prévoit que des températures extrêmement élevées sont atteintes en quelques dizaines de nanosecondes, et la pratique semble le confirmer. L'anode entre en fusion sous l'impact des électrons, quel que soit le matériau utilisé (Au, Ru et W ont été testés). Ce phénomène est très similaire au principe de fonctionnement d'un évaporateur à bombardement électronique. En effet, dans un tel dispositif, un filament de tungstène est chauffé par application d'un courant élevé, ce qui entraîne une émission d'électrons par effet thermoïonique. Ce flux d'électrons est alors défléchi grâce à des bobines magnétiques et dirigé vers le matériau à évaporer placé dans un creuset refroidi par eau. Le bombardement du matériau par les électrons entraîne son échauffement et donc son évaporation. L'évaporation sous bombardement électronique est donc basée sur le même phénomène que celui mis en évidence, à l'exception près que dans notre cas l'émission électronique est obtenue par effet Fowler-Nordheim.

5.6. Evaporation du matériau anodique

L'évaporation d'une surface solide est directement liée au changement de phase du matériau sous l'effet de la température. Lorsqu'un matériau se vaporise, le système passe à un moment par un équilibre thermodynamique. Lors de cette phase d'équilibre, la phase condensée et sa vapeur coexistent à la même température et sont en contact l'une avec l'autre. La pression de vapeur à cet équilibre est un paramètre important car il détermine la faisabilité d'une évaporation et sa vitesse. La vitesse d'évaporation d'un matériau à une température donnée est en effet directement proportionnelle à sa pression de vapeur à cette température. La vitesse d'évaporation massique d'une surface solide a été établie par Langmuir en se basant sur les travaux de Hertz et Knudsen [Maissel1970] :

$$\Gamma = 5.834 \times 10^{-2} \cdot \left(\frac{M}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot p^* \quad (4.12)$$

Cette équation fournit une vitesse d'évaporation en $\text{g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$, dans laquelle M représente la masse molaire du matériau considéré, T la température en K à laquelle le matériau est chauffé et p^* la pression de vapeur du matériau à cette température (en Torr). La vitesse d'évaporation d'un matériau est donc directement proportionnelle à sa pression de vapeur. Les pressions de vapeur des trois matériaux testés sont données sur la Figure 140 en fonction de la température et nous indiquent que l'évaporation débute dès 1100K pour l'or, 1850K pour le ruthénium et 2500K pour le tungstène. Ces températures correspondent, si nous nous fondons sur les données fournies par la Figure 135, à des temps d'échauffement anodique inférieurs à 10ns !

²⁰ La zone de fusion observée sur le tungstène est importante comparée à l'or. Les dépôts de tungstène que nous avons utilisé sont très contraints, il se peut donc que sous l'effet de la chaleur la couche se décolle (comme c'est le cas lors des clivages) et donc donne cette impression de fusion importante.

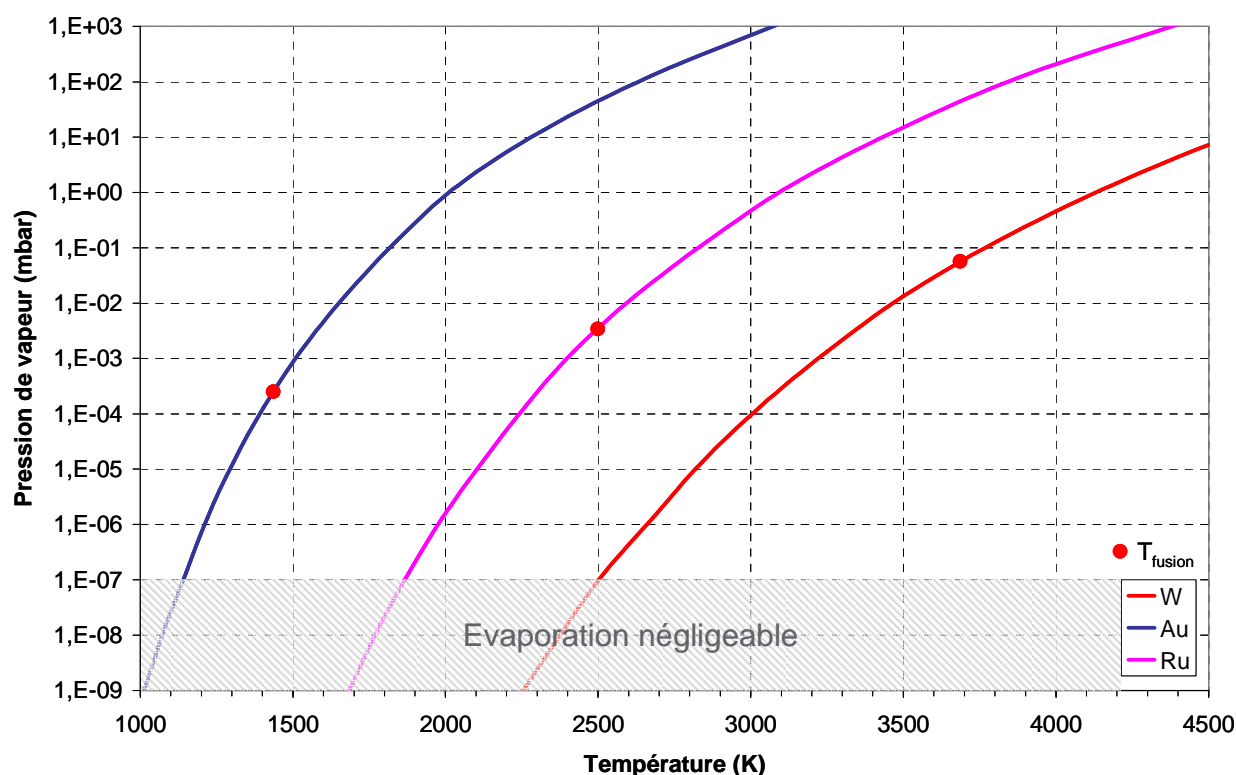


Figure 140. Pression de vapeur des matériaux testés en fonction de la température [Maissel1970].

L'évaporation est toujours pratiquée sous vide poussé, ceci dans le but d'éviter que les atomes évaporés n'entrent en collision avec les molécules de gaz et atteignent ainsi le substrat à coup sûr. L'énergie moyenne des atomes quittant la surface à une température T est égale à :

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} k.T \quad (4.13)$$

Cette énergie correspond à une vitesse de l'ordre de plusieurs centaines de mètres par seconde. Or dans notre cas, la distance inter-contacts est ultra-réduite, très peu de molécules de gaz sont donc présentes dans cet intervalle et le libre parcours moyen d'un atome d'or à pression atmosphérique et à température ambiante est de l'ordre de 400nm²¹. Les atomes évaporés n'interagissent donc pas du tout avec l'atmosphère gazeuse lors de leur traversée inter-contacts. Ils atteignent, de plus, l'électrode opposée en un temps quasiment nul, comme le montre la Figure 141 suivante.

²¹ Calcul effectué en considérant des surfaces effectives de collision entre les molécules de l'air ambiant et les atomes d'or. Le libre parcours moyen est alors égal à $\lambda = \frac{RT}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot N_A \cdot P}$ avec d le rayon effectif de collision (moyenne des rayons de chaque type de molécule) et P la pression [Jewett2007].

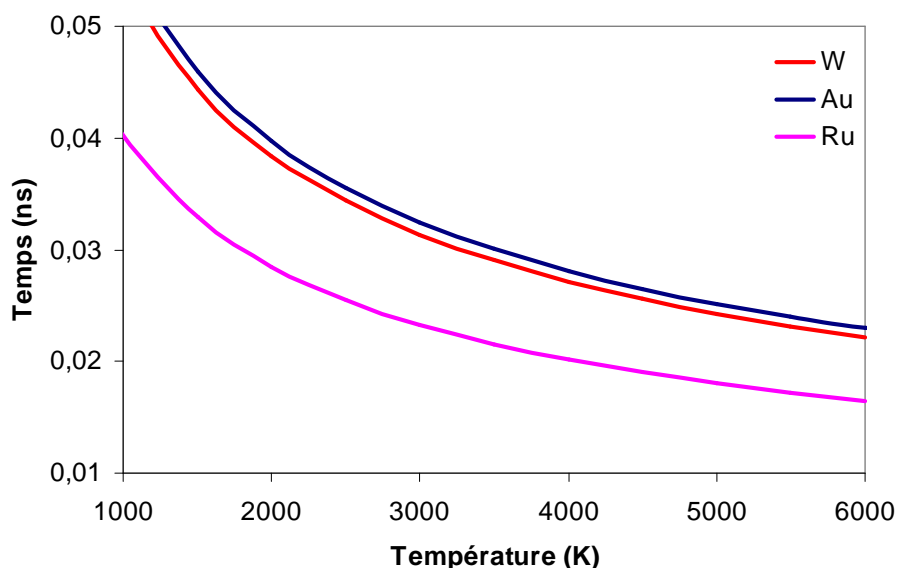


Figure 141. Temps de traversée de l'espace inter-contact des atomes évaporés en fonction de leur température d'évaporation.

L'énergie cinétique importante des atomes évaporés et l'absence d'interaction dans l'espace inter-contacts engendre un transfert quasi-immédiat des atomes évaporés depuis l'anode vers la cathode : quelques dizaines de picosecondes tout au plus quels que soient le matériau et la température d'évaporation. Pour vérifier ce mécanisme de transfert, nous procédons alors à une série de tests sur le micro-contact expérimental.

Un levier recouvert d'or est toujours utilisé, mais il est cette fois-ci polarisé négativement, il joue donc le rôle d'émetteur d'électrons (cathode). Comme anode nous utilisons successivement un substrat recouvert d'or, de ruthénium et de tungstène, et nous utilisons un levier neuf pour chaque substrat. Nous procédons alors à une centaine de cycles sur chaque substrat, sous 5V/1mA, dans le but de confirmer que le matériau de l'anode est transféré vers la cathode (cf. Figure 142-(a)).

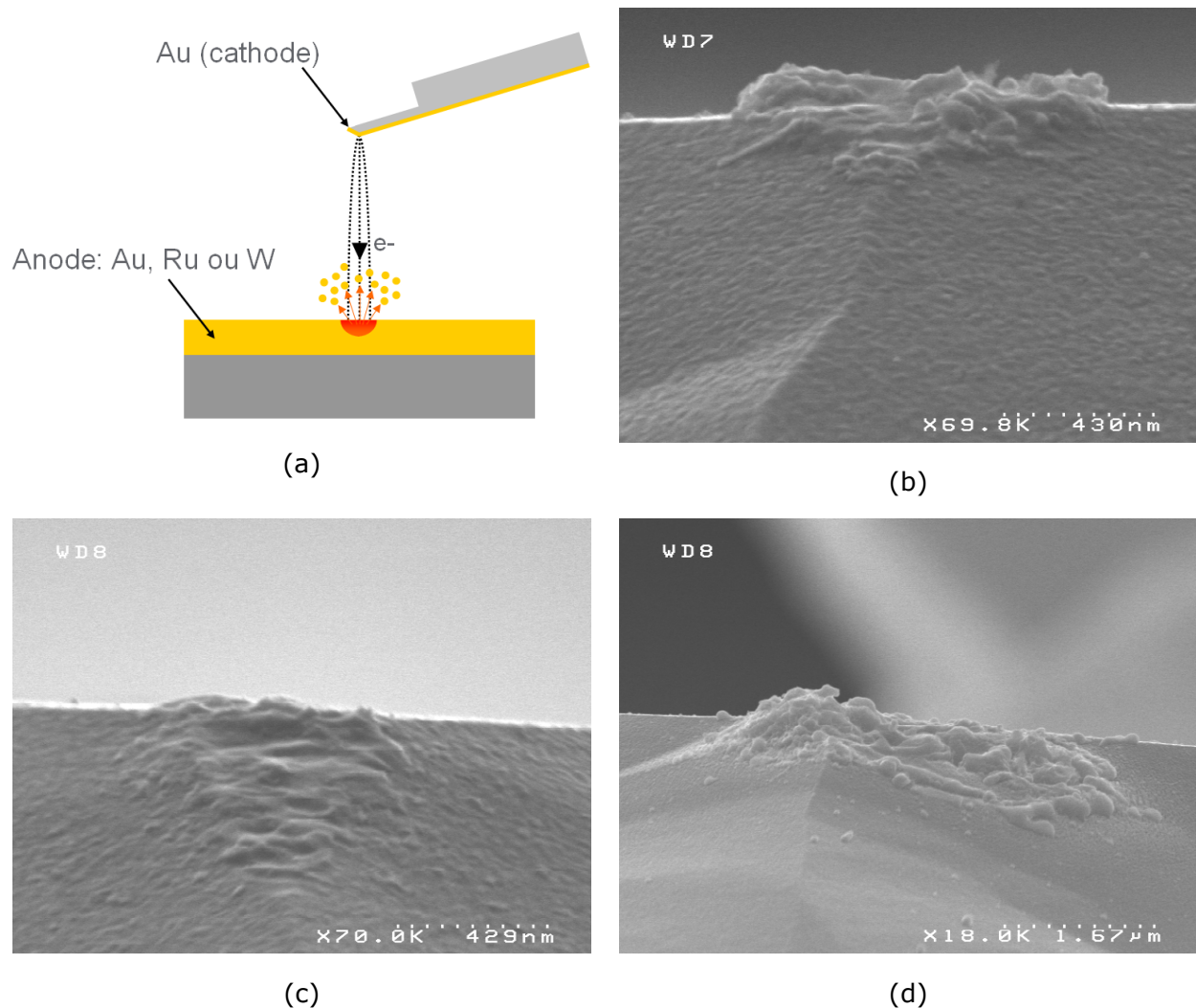


Figure 142. Evaluation de la tenue à l'érosion des trois matériaux. (a) Principe du mécanisme d'érosion. (b-c-d) Observation MEB des leviers AFM à l'issue des tests.

Les clichés MEB ci-dessus représentent l'état de la surface des leviers AFM à l'issue des 100 cycles de commutation. Nous observons dans les trois cas l'apparition de matière supplémentaire. Un transfert de matière de l'anode vers la cathode a donc bien eu lieu quel que soit le matériau, comme nous l'avons déjà observé précédemment. Il faut noter que lorsqu'un matériau s'évapore de la sorte, le front d'évaporation a un profil cosinusoidal [Maissel1979]. Une partie de la matière évaporée se retrouve alors sur le pourtour de la zone d'évaporation mais la majorité se retrouve sur l'électrode opposée.

Dans ce cas les contacts sont dissymétriques et une analyse en électrons rétrodiffusés au MEB nous permet d'affirmer que dans le cas (b) le matériau formant le monticule observé est de la même nature que le matériau recouvrant le levier : de l'or. Dans les cas (c) et (d) des contrastes nets (en particulier pour le ruthénium) entre le matériau du levier et les matériaux du monticule sont visibles. Ceci permet donc d'affirmer que le matériau déposé sur le levier (cathode) provient du substrat (anode) par évaporation sous l'effet du bombardement électronique.

5.7. Mécanisme de transfert

Pour résumer l'intégralité de l'étude que nous venons de faire, un schéma du mécanisme complet est nécessaire. La figure suivante présente le mécanisme de transfert de matière dirigé de l'anode vers la cathode que nous avons mis en évidence.

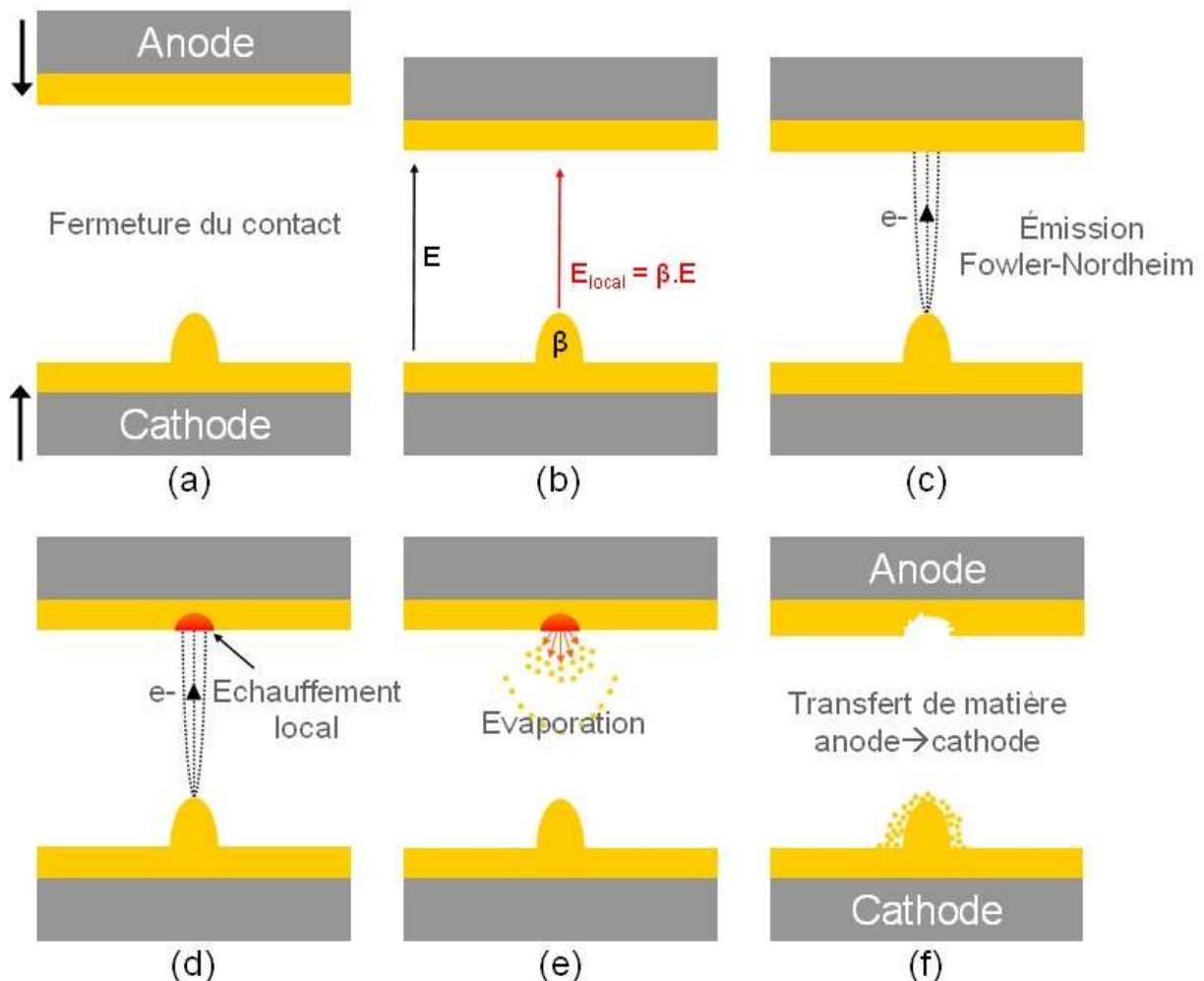


Figure 143. Représentation schématique du mécanisme de transfert de matière complet.

Le mécanisme se décompose en six étapes distinctes :

- (a) Le micro-interrupteur se ferme, les deux contacts se rapprochent progressivement tandis qu'une tension continue de 5V est appliquée aux bornes du contact.
- (b) Le champ électrique ($E=V/\text{gap}$) entre les deux contacts augmente progressivement. La présence de rugosités sur la surface cathodique engendre une amplification locale du champ électrique par effet de pointe. Le champ est localement β fois plus intense, β variant dans notre cas entre 10 et 50.
- (c) Lorsque la distance inter-contacts est réduite à 10-30 nm, le champ entre les contacts est de quelque 10^8 V/m. L'amplification locale du champ permet cependant d'obtenir un champ local de $3 \cdot 10^9$ V/m au niveau des rugosités, suffisant pour déclencher l'émission d'électrons par effet Fowler-Nordheim. L'effet

est instantané et augmente à mesure que le contact se ferme : quelques μA sont émis depuis les rugosités de la cathode.

- (d) Ce flux d'électrons percute alors l'anode, engendrant une densité locale d'énergie suffisamment importante pour échauffer à plusieurs milliers de degrés la zone d'impact anodique.
- (e) Sous l'effet de cet échauffement très localisé, le matériau de l'anode s'évapore et en quelques dizaines de picosecondes les atomes évaporés ont parcouru la faible distance inter-contacts : du matériau de l'anode se dépose sur la cathode.
- (f) De cet enchaînement de phénomènes (qui se produit en continu jusqu'à fermeture complète du contact) résulte un net transfert de matière dirigé de l'anode vers la cathode.

Décomposé de la sorte le mécanisme est clair. Nous avons toutefois volontairement laissé de côté un phénomène : l'échauffement des rugosités émettrices. L'émission de courant provoque, en effet, l'échauffement du site émissif. Cet échauffement met en jeu deux phénomènes : l'effet Joule et l'effet Nottingham et est fortement dépendant de la forme de la rugosité et du substrat sur lequel elle repose [Zeitoun1991]. Nous avons négligé ce phénomène mais il ne doit pas être totalement exclu, car il peut générer des transferts de matière dirigé dans le sens inverse du phénomène que nous venons de décrire : les atomes s'évaporant des rugosités émettrices vont, de la même façon, se déposer sur l'électrode opposée, l'anode. Cependant les tests que nous avons effectués, complétés par les résultats obtenus sur le micro-interrupteur nous indiquent que le mécanisme de transfert prédominant est celui présenté en Figure 143.

5.8. Retour sur la cinétique du mécanisme de transfert

Les tests effectués sur le banc de test ont tous été effectués à des vitesses allant de 6 à 30 nm/s. Or nous avons vu que le micro-interrupteur opère à plusieurs mm/s, soit plusieurs ordres de grandeur au-dessus. Il est donc légitime de se demander si les phénomènes que nous avons observés et mis en évidence ont le temps de se produire lors de l'utilisation du micro-interrupteur.

L'émission électronique que nous avons mesurée se produit lorsque la distance inter-électrodes est inférieure à environ 20nm pour l'or, ce qui représente un champ de $3 \cdot 10^8$ V/m (le champ local est supérieur, d'un facteur $\beta \approx 10$). Dès que le champ est supérieur à cette valeur, de l'émission électronique a donc lieu et engendre un transfert de matière suivant le mécanisme décrit précédemment. A une vitesse de 30 nm/s, le micro-contact se trouve dans la zone critique durant environ une demi-seconde. Mais à la vitesse du micro-interrupteur, les contacts restent seulement 5 microsecondes dans la zone où les conditions d'émission électronique sont remplies.

Nous avons mentionné précédemment que l'émission électronique Fowler-Nordheim est un phénomène quasi-instantané, se produisant en quelques femtosecondes et les électrons traversent ensuite l'espacement inter-contacts en moins d'une picoseconde²².

²² Un calcul approximatif, en supposant un champ constant de $2,5 \cdot 10^8$ V/m dans l'espace inter-contacts (d) nous donne $t = \sqrt{\frac{2d}{a}}$, avec a l'accélération d'un électron sous l'effet de la force électrostatique $\left(a = \frac{q}{m} E\right)$.

L'échauffement de l'anode atteint ensuite plusieurs milliers de degrés en une dizaine de nanosecondes, engendrant l'évaporation du matériau anodique. Les atomes évaporés traversent ensuite l'espace inter-contacts en 20ps environ. Si nous faisons la somme de ces temps, nous nous apercevons que le phénomène complet se produit en une dizaine de nanosecondes.

Le micro-interrupteur reste 5μs dans la zone d'émission électronique, le phénomène de transfert de matière que nous avons mis en évidence à donc plus de 100 fois le temps de se produire ! Ceci nous indique que le mécanisme de transfert de matière mis en évidence à l'aide de notre banc de test peut être le même que celui se produisant dans le micro-interrupteur.

5.9. Comparaison avec un arc sous vide (*vacuum arc*)

Tout au long de l'étude précédente un parallèle a été fait entre les phénomènes observés et les commutateurs macroscopiques opérant sous vide. La réduction des dimensions à une échelle nanométrique engendre, en effet, des conditions proches de celles du vide : le libre parcours moyen des électrons et des atomes évaporés est supérieur aux espacements de nos contacts, et l'atmosphère gazeuse inter-contacts ne joue alors plus aucun rôle (hormis un rôle surfacique). De plus, cet espacement nanométrique engendre des champs électriques intenses, même si seulement quelques volts sont appliqués entre les deux électrodes de contact. Ces champs sont alors aussi importants que dans des commutateurs opérant sous des centaines de kilovolts avec des espacements inter-contacts de quelques centimètres. Les phénomènes engendrés sont alors similaires et leurs conséquences dramatiques aussi.

Une différence notable existe toutefois entre notre micro-contact et un commutateur sous vide. En effet, si nous examinons le mécanisme à l'origine d'une rupture diélectrique dans le vide (cf. Figure 144), nous remarquons que les premières étapes sont identiques à notre cas : un nuage de vapeur métallique se développe au niveau de l'anode sous l'effet du bombardement électronique Fowler-Nordheim. Ce courant est appelé courant pré-disruptif, il est continu, principalement électronique et fortement dépendant du champ. Son intensité initiale est inférieure ou égale au μA, comme dans notre cas. Lorsque sa valeur dépasse 1μA, des fluctuations spécifiques apparaissent et son tracé en coordonnées Fowler-Nordheim présente des cassures ou des sauts, comportement similaire à ce que nous observons.

Au niveau de la cathode, le site émissif s'évapore sous l'effet du courant qu'il émet et un nuage de vapeurs métalliques se développe à son voisinage. Comme explicité précédemment nous avons volontairement négligé ce phénomène dans notre cas. Nous nous apercevons cependant que jusqu'à maintenant les phénomènes que nous observons sont similaires aux phénomènes disruptifs dans le vide.

Si $d=20\text{nm}$, nous trouvons $t = 0.03 \text{ ps}$. Ce calcul n'est pas rigoureux, le champ n'est pas uniforme entre les deux électrodes, mais il nous fournit un ordre de grandeur.

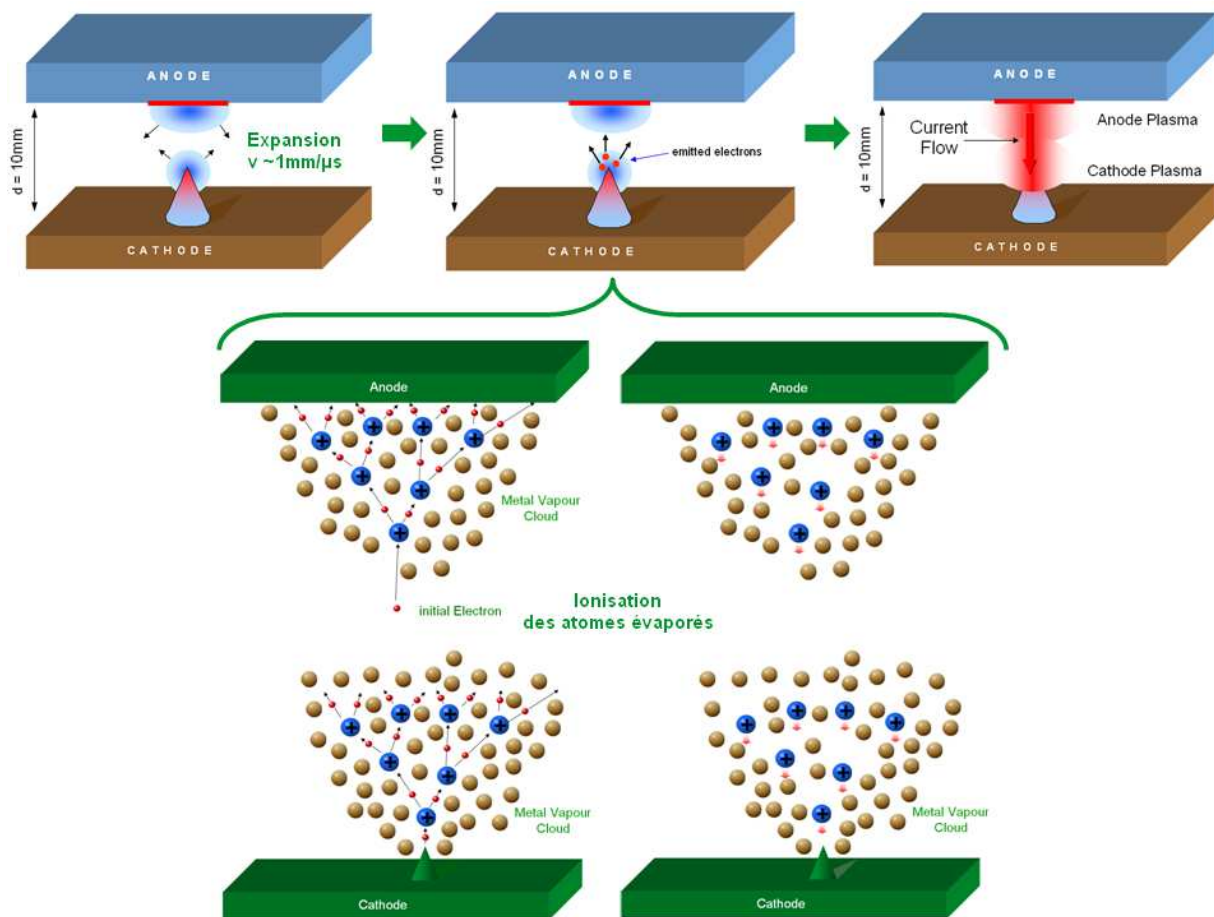


Figure 144. Mécanisme de la rupture diélectrique dans le vide. [Rowe2009]

Ces deux nuages métalliques grossissent progressivement, tandis que le site émissif continue d'émettre des électrons. Ces électrons entrent en collision avec les atomes métalliques et par effet d'avalanche ionisent fortement les deux nuages métalliques. Les atomes évaporés sont ionisés et accélérés par le champ électrique. Ils peuvent alors entrer en collision avec les atomes évaporés et donc accentuer l'ionisation du milieu, ou pulvériser la cathode et donc densifier le nuage métallique. Dans tous les cas le phénomène d'avalanche est enclenché et aboutit à la formation d'un plasma conducteur entre les électrodes : le vide devient conducteur, un arc électrique s'est formé.

Ce phénomène d'avalanche implique l'ionisation des atomes évaporés par les électrons émis. Le potentiel de première ionisation des trois matériaux que nous étudions est de l'ordre de 7 à 9 V : 7.37 pour le Ru, 7.98 pour le W et 9.22 pour l'Au. Cependant dans notre cas, le micro-contact est polarisé à 5V, les électrons ne sont donc pas assez énergétiques pour ioniser les atomes évaporés. De plus, le libre parcours moyen des électrons ne permet pas cette ionisation. En effet, dans l'air à pression atmosphérique celui-ci est d'environ $0.5\ \mu\text{m}$. Donc les électrons émis par la cathode traversent les 20 nm de l'espacement inter-contacts sans aucune interaction possible avec les atomes évaporés. Ce libre parcours moyen varie en fonction de la pression cependant, et plus le matériau de l'anode s'échauffe, plus il s'évapore et donc plus la pression augmente dans l'espace inter-contact. Les électrons n'évoluent alors plus dans l'air mais dans les vapeurs métalliques.

Il est possible d'évaluer le libre parcours moyen d'un électron dans un gaz composé d'atomes d'or évaporés, comme précédemment. La Figure 145 suivante représente l'évolution du libre parcours moyen de l'électron en fonction de la pression.

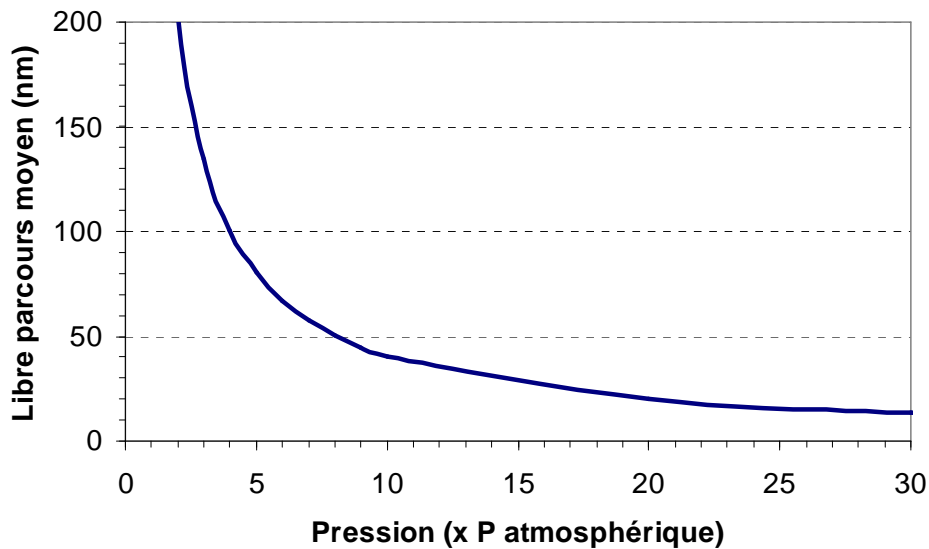


Figure 145. Evolution du libre parcours moyen d'un électron dans un gaz d'atomes d'or, en fonction de la pression.

Pour que le libre parcours moyen des électrons soit inférieur à la distance inter-électrodes (10-20 nm) et donc que les électrons puissent interagir avec les atomes évaporés, la figure 54 nous indique qu'une pression de 25 fois la pression atmosphérique est nécessaire. Un cylindre de 5 nm de diamètre (taille du spot anodique d'évaporation) et 20nm de hauteur (distance inter-électrodes), contient à pression atmosphérique environ 40 molécules d'air. Pour que la pression soit 25 fois supérieure, 1000 atomes d'or doivent remplir ce volume, et ce en 20ps (temps de traversée inter-contacts d'un atome évaporé). Ceci représente donc une vitesse d'évaporation du spot anodique de 10^{13} atomes/seconde. Si nous convertissons cette vitesse dans les unités classiques, ceci représente environ $20000 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Considérons la valeur maximale de pression de vapeur présenté sur la Figure 140 (10^3 mbars pour 3130K) et calculons la vitesse d'évaporation que cela représente :

$$\Gamma = 5.834 \times 10^{-2} \cdot \left(\frac{196.97}{3130} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot 1000 = 14.6 \text{ g / cm}^2 / \text{s}$$

Nous remarquons que la vitesse d'évaporation dont nous aurions besoin pour augmenter la pression entre les deux contacts est plus de 1000 fois supérieure à la vitesse d'évaporation maximale classiquement observée. Obtenir une pression de 25 fois la pression atmosphérique dans l'espace inter-contacts est donc totalement exclu. Les électrons ne peuvent donc pas interagir avec les atomes évaporés et donc aucun claquage n'est possible. Nous ne sommes donc pas exactement dans les mêmes conditions qu'un claquage sous vide, seule la première étape du claquage se produit : la phase pré-disruptive.

6. Etude de la phase d'ouverture du contact

Nous venons de voir que la phase de fermeture d'un micro-contact sous courant entraîne des transferts de matière parfois importants. Cependant, la commutation du courant implique évidemment une phase d'ouverture sous courant, phase qui bien souvent est la plus critique dans un commutateur macroscopique. Comme expliqué dans la première partie de ce chapitre, l'ouverture sous courant engendre un pont fondu qui, lors de sa rupture, peut créer un arc électrique. De la même façon que pour la phase de fermeture du contact, nous allons procéder à des ouvertures sous courant à vitesse réduite grâce à notre micro-contact expérimental.

6.1. Mise en évidence d'un éventuel pont fondu

Dans un premier temps le micro-contact est actionné à 60 nm/s, sous 5V/1mA. Une série de commutations est effectuée, en enregistrant la tension et le courant synchronisés avec le déplacement du levier AFM. La superposition des phases d'ouverture et de fermeture du micro-contact nous fournit de nombreuses informations (cf. Figure 146).

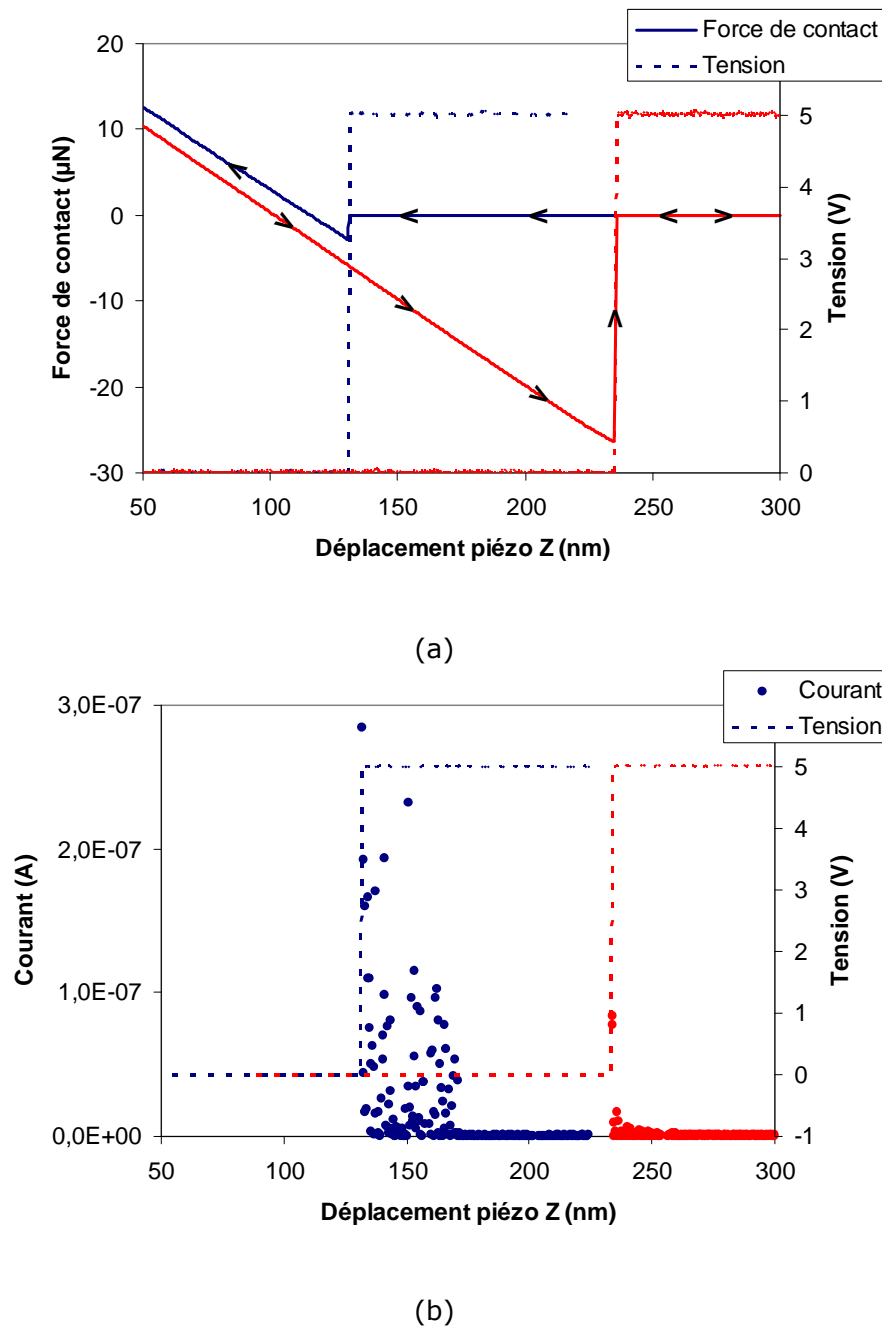


Figure 146. Superposition de la fermeture et de l'ouverture du micro-contact. (a) Force de contact et tension aux bornes du contact. (b) Tension aux bornes du contact et courant.

Nous observons toujours de l'émission électronique une trentaine de nanomètres avant la fermeture mécanique du contact. Cependant un tel phénomène n'est pas observable lors de l'ouverture du contact. La superposition de la déflexion du levier lors de l'ouverture et de la fermeture révèle qu'un décalage de quasiment 100nm est présent. Ceci signifie que lorsque le contact se rompt mécaniquement, le levier se trouve à 100nm de la surface si un pont fondu s'est développé entre les deux contacts du fait de la présence de courant.

La superposition parfaite de la rupture mécanique avec la rupture électrique semblent confirmer ce phénomène. Nous procédons alors à deux séries de commutations, avec et sans polarisation du contact. Comme nous l'avons vu précédemment, la déflexion du

levier AFM permet d'évaluer la valeur des forces d'adhésion présentes entre le levier et le substrat. Ce test va alors permettre de savoir si ce décalage à l'ouverture est bien d'origine électrique (et des effets thermiques qui en découlent). La figure suivante présente la comparaison de ces deux types de commutation.

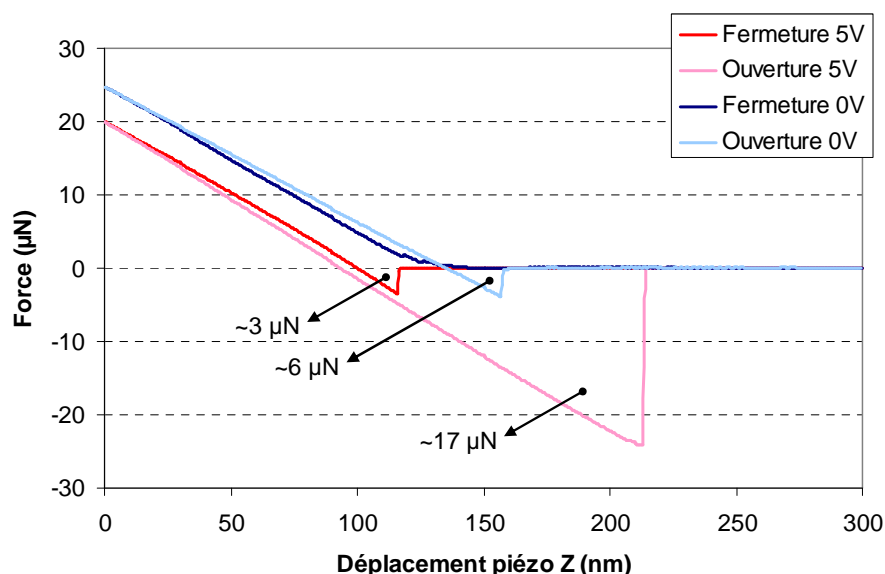


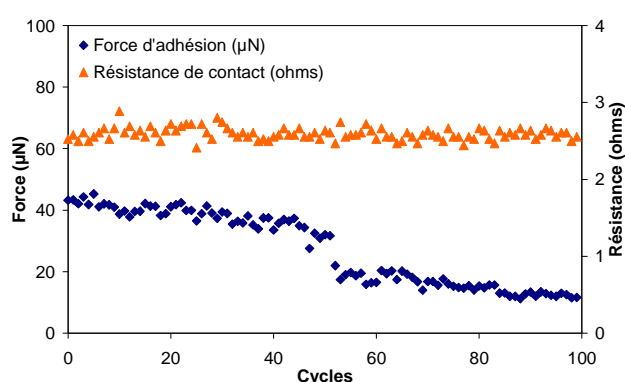
Figure 147. Comparaison des forces d'adhésion lors de l'ouverture et de la fermeture du micro-contact, avec et sans polarisation.

Nous observons que lors d'une fermeture sous courant, une force d'attraction d'environ $3\mu\text{N}$ apparaît entre les deux contacts. Cette attraction peut être attribuée à la force électrostatique générée par la différence de potentiel entre les deux contacts. Le plus intéressant est la différence non négligeable qu'il existe entre l'ouverture sans polarisation (environ $6\mu\text{N}$) et l'ouverture sous 5V (environ $17\mu\text{N}$). Les $6\mu\text{N}$ observés sans polarisation correspondent aux forces d'interactions surfaciques précédemment évoquées, mais les $10\mu\text{N}$ supplémentaires lorsque la commutation est effectuée sous 5V sont pourraient être imputés à la présence d'un phénomène de fonte locale. Nous avons en effet vu que les ruptures mécanique et électrique étaient parfaitement superposées : aucune force électrostatique ne peut donc se développer et expliquer cet écart, les deux électrodes étant toujours au même potentiel pendant cette période.

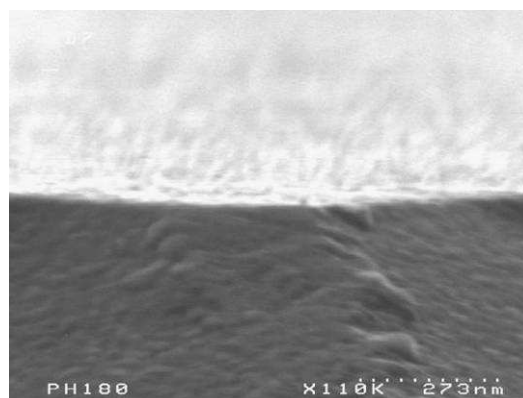
Lors de l'ouverture d'un micro-contact sous courant, il apparaît donc un phénomène d'adhésion entre les deux membres du contact. Cette adhésion peut être le résultat d'un pont fondu ou simplement d'une micro-soudure des deux contacts. Nous ne sommes malheureusement pas capables de distinguer ces deux phénomènes, nous pouvons simplement dire qu'une fonte locale se produit. Nous avons alors observé que cette adhésion liée au passage du courant lors de l'ouverture avait pour effet d'entraîner un décalage lors de l'ouverture. Ce décalage a pour conséquence qu'aucune émission électronique ne se produit lors de l'ouverture, les contacts étant déjà trop éloignés lorsque le contact se rompt.

6.2. Conséquences sur la dégradation du contact

Précédemment, pour étudier la phase de fermeture du contact, nous avons réalisé une série de 100 cycles en n'appliquant pas la tension lors de l'ouverture. Nous procédons cette fois-ci au même test mais n'appliquant pas la tension lors de la fermeture. Ainsi, seules les phases d'ouverture du contact se font sous courant, toujours avec le calibre 5V/1mA. Ceci va nous permettre de vérifier l'hypothèse que nous venons d'émettre, à savoir que lors de l'ouverture du contact l'adhésion permet de se prémunir de l'émission électronique. Les conditions de test sont alors les mêmes que lors du test cité, à savoir un contact or/or, une vitesse d'actionnement de 30 nm/s et le levier AFM polarisé positivement. Les données récoltées durant ce cyclage sont représentées sur la Figure 148-a et une observation MEB du levier AFM à l'issue du cyclage est présentée en Figure 148-b.



(a)



(b)

Figure 148. Cyclage de 100 ouvertures sous courant. (a) Evolution de la résistance de contact et de la force d'adhésion en fonction des cycles. (b) Observation MEB du levier AFM à l'issue du cyclage.

Nous remarquons que la résistance de contact reste stable tout au long du cyclage, et l'observation du levier nous révèle que la surface de contact a été très peu modifiée. Des zones de fusion sont clairement visibles, ce qui confirme notre observation précédente. Les surfaces sont par contre beaucoup moins dégradées que lors du test de fermetures sous courant effectué précédemment (cf. Figure 138). Les deux tests ayant été effectués exactement dans les mêmes conditions, nous pouvons en déduire que la phase d'ouverture du contact est moins dommageable que la phase de fermeture. L'absence d'émission électronique lors de l'ouverture semble donc confirmée. La fusion que nous observons à l'issue de ce test sur la Figure 148 serait simplement le résultat d'une fusion locale liée au passage du courant lorsque le contact est fermé.

Cependant la Figure 148-a nous révèle aussi que la force d'adhésion diminue au cours du cyclage, phénomène déjà observé sur les cyclages précédents. Ceci traduit une modification des surfaces ou la croissance d'une couche de contamination, mais nous indique aussi que l'adhésion, qui nous prémunit contre l'émission électronique, a tendance à s'atténuer au cours du cyclage. Il est donc possible que de l'émission électronique ait lieu aussi pendant la phase d'ouverture, à terme.

6.3. Emission électronique lors de la phase d'ouverture

Nous allons voir que dans certaines conditions nous observons de l'émission électronique lors de la phase d'ouverture, indépendamment du phénomène que nous venons d'énoncer. Deux cas ont été mis en évidence : lorsque la vitesse d'ouverture est ultra-réduite (6 nm/s) et lorsque l'humidité est réduite ($RH < 1\%$). La figure suivante met en évidence cette émission électronique.

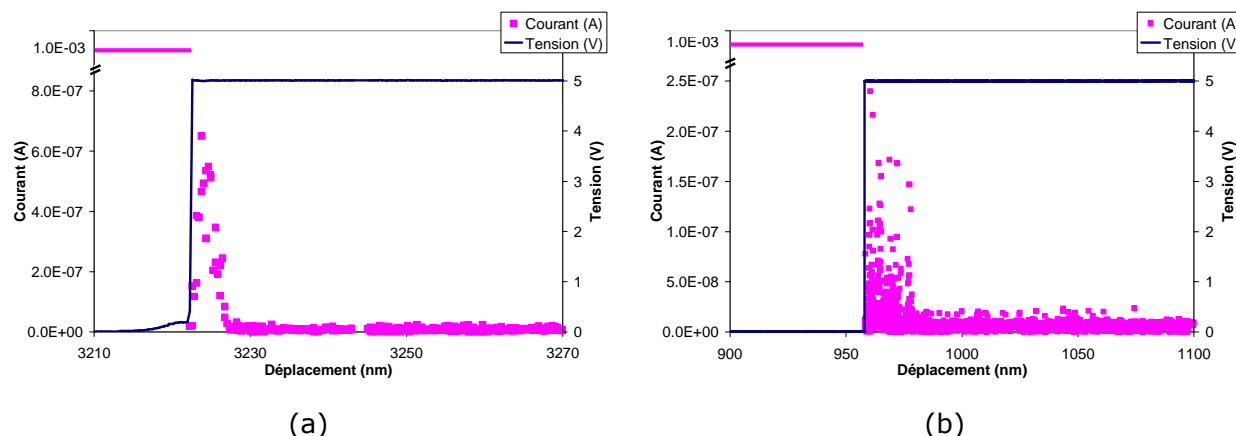


Figure 149. Observations d'émission électronique lors de l'ouverture du contact. (a) A vitesse ultra-réduite (6nm/s). (b) Sous humidité réduite ($RH < 1\%$).

Ces dernières observations, ajoutées au scénario énoncé dans le paragraphe précédent, montrent que la présence d'émission électronique lors de l'ouverture du contact n'est pas à écarter. Ceci est d'autant plus vrai que le paramètre permettant d'éviter l'émission électronique lors de l'ouverture -l'adhésion- est difficilement contrôlable tout au long de la durée de vie d'un micro-interrupteur.

7. Conclusions

Les tests d'endurance sous courant menés sur le micro-interrupteur ont mis en évidence des transferts de matière toujours dirigés de l'anode vers la cathode. L'observation de tels transferts de matière, obtenus dans des conditions similaires aux nôtres, a déjà été rapportée à plusieurs reprises. Cependant jamais aucune explication argumentée n'a été fournie pour expliquer ces phénomènes. Les valeurs de courant et de tension utilisées sont en effet trop faibles pour engendrer les phénomènes de claquage ou d'arc électrique à l'origine des transferts de matière existant à l'échelle macroscopique. Nous avons alors dans un premier temps pris soin de vérifier l'absence de tels phénomènes.

Il a cependant été montré durant ces dix dernières années que la Loi de Paschen n'était plus valable pour des espacements inter-contacts inférieurs à $5\mu\text{m}$. A des distances aussi réduites la tension de claquage est réduite et suit la loi de comportement d'un claquage dans le vide. Malheureusement tous les travaux relatant cette déviation ont été réalisés à des tensions beaucoup plus élevées que celles auxquelles nous opérons et donc ces résultats ne sont pas suffisants pour expliquer le phénomène que nous observons.

Nous avons alors développé un banc de test reproduisant le fonctionnement d'un micro-interrupteur tout en permettant un contrôle précis de sa vitesse de commutation. A l'aide

de ce micro-contact expérimental nous avons mis en évidence qu'aux tensions auxquelles le micro-interrupteur opère, de l'émission électronique par effet Fowler-Nordheim avait lieu plusieurs dizaines de nanomètres avant la fermeture mécanique du contact. Ces électrons émis par la cathode bombardent alors l'anode, provoquant un échauffement local important et une évaporation du matériau anodique. Ce matériau se dépose ensuite sur la cathode, générant un transfert de matière toujours dirigé de l'anode vers la cathode.

Ainsi, nous avons enfin mis en évidence et décrit le phénomène de transfert de matière observé dans les micro-interrupteurs. Toutefois ce mécanisme diffère du claquage dans le vide à l'origine de la déviation de la Loi Paschen. La tension est en effet trop faible pour entraîner un claquage diélectrique, et la distance inter-contacts ultra-réduite à laquelle le phénomène se produit rend quasiment impossible une interaction entre les électrons et les atomes évaporés. Le claquage diélectrique du milieu inter-contacts est donc invisable, seule la phase pré-disruptive -se limitant à de l'émission électronique et de l'évaporation- a lieu.

En essayant d'élargir ces observations, nous pouvons dire que la réduction d'échelle a des conséquences inattendues sur le claquage diélectrique. La Loi de Paschen est violée pour des distances inter-contacts inférieures à 5 μm , fait admis depuis une dizaine d'années, mais ceci reste vrai uniquement pour des tensions supérieures à environ 7V. En dessous de ce seuil, correspondant à la tension d'ionisation des métaux courants, un claquage ne peut a priori pas avoir lieu. De plus, si la distance inter-contacts est réduite à quelques dizaines de nanomètres une rupture diélectrique devient difficilement concevable, la pression inter-contacts nécessaire étant irréalisable.

Ces travaux ont permis d'identifier clairement les paramètres entrant en jeu dans le phénomène de transfert de matière. La cathode et l'anode ne répondent pas aux mêmes critères, nous pouvons ainsi énoncer les recommandations suivantes concernant la cathode :

- le travail de sortie (Φ) doit être le plus grand possible,
- la rugosité la plus faible possible (β faible),
- la présence de couches isolantes proscrite (β et Φ modifiés),
- les espèces adsorbées sur les surfaces doivent être contrôlées (Φ et S modifiés).

Concernant l'anode, les recommandations sont différentes et plutôt d'ordre thermique:

- la température de fusion doit être élevée,
- la conductivité thermique aussi.

De plus, nos travaux tendent à montrer que comme dans les contacts macroscopiques, la vitesse de commutation a un rôle primordial et doit être la plus élevée possible.

En prenant en compte ces considérations, le choix d'un matériau de contact résistant aux transferts de matière est facilité. Nous aborderons ce point dans le chapitre suivant, lorsque nous imaginerons les améliorations à apporter au micro-interrupteur. En attendant, revenons un peu en arrière et examinons quelques résultats obtenus sur le micro-interrupteur à la lumière des résultats obtenus dans ce chapitre.

8. Retour sur le micro-interrupteur

Nous avons abordé précédemment la question de la vitesse d'actionnement du micro-contact expérimental, qui est plusieurs ordres de grandeurs inférieure à celle du micro-interrupteur. La conclusion a été que le phénomène de transfert de matière est très rapide (10ns) et donc qu'il a tout à fait le temps de se produire lors de l'actionnement du micro-interrupteur. Bien évidemment si la vitesse de commutation est réduite, le transfert de matière engendré est plus important. Une corrélation directe entre vitesse de commutation et quantité de matière transférée est donc évidente et explique les durées de vie réduites observées lors de l'utilisation de bancs d'endurance à actionnement lent (cf. Tableau 20 de ce chapitre). Les observations que nous avons réalisées sur le banc de test et les mécanismes que nous avons décrits restent donc tout à fait valables pour le micro-interrupteur. La grande différence est que la quantité de matière transférée à chaque commutation sera moindre dans le cas du micro-interrupteur.

Les résultats obtenus nous permettent d'expliquer plusieurs résultats obtenus sur le micro-interrupteur. Ainsi, les pics de courant que nous observons lors de la fermeture du micro-interrupteur sous 14V/10mA au début du chapitre ont maintenant une explication. Connaissant la vitesse de commutation du composant, il est possible de remonter à l'espacement inter-contacts et donc au champ électrique. En transposant un des enregistrements obtenus à l'oscilloscope dans le système de coordonnées Fowler-Nordheim nous obtenons la Figure 150 ci-dessous.

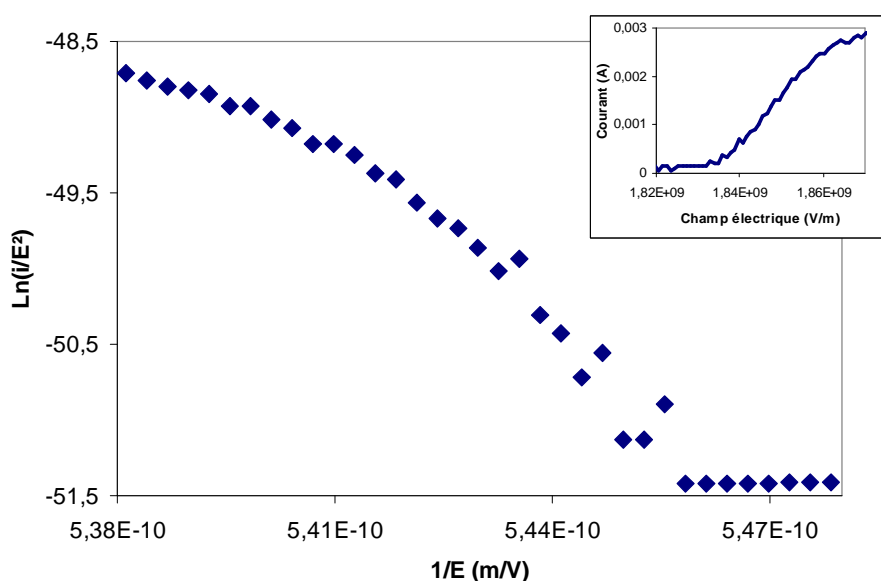


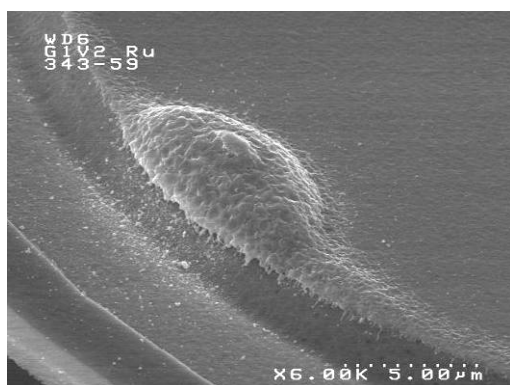
Figure 150. Tracé en coordonnées Fowler-Nordheim d'un pic de courant observé précédemment sur le micro-interrupteur.

Le tracé obtenu est linéaire et de pente négative, nous indiquant que le courant que nous mesurons est sûrement dû à de l'émission électronique par effet Fowler-Nordheim. Le tracé n'est cependant pas strictement linéaire, la pente semble diminuer quand le courant émis augmente. Ceci peut révéler un phénomène d'écrantage du champ électrique, lié au nombre important d'électrons émis. Les phénomènes observés sur le

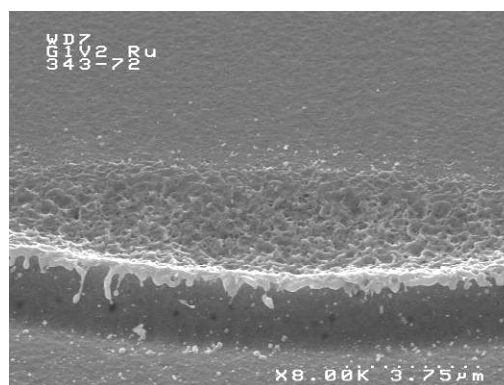
micro-interrupteur sont donc de la même nature que ceux mis en évidence grâce au banc de test que nous avons développé.

Nous remarquons aussi que le courant maximal d'émission ne dépasse pas 2.5mA, alors que le courant du circuit d'alimentation est limité à 10mA. La rupture diélectrique du milieu gazeux inter-contacts n'a donc pas lieu, sinon le courant atteindrait 10mA. Nous sommes seulement en phase pré-disruptive, comme lors des tests à 5V. Or ce test est effectué sous 14V, tension normalement suffisante pour ioniser les atomes évaporés. Mais à ces espacements aussi faibles l'interaction des électrons avec les atomes évaporés est impossible, nous l'avons vu et ce test semble le confirmer. Même à 14V, les conditions d'une rupture diélectrique durant la commutation ne sont pas remplies. Ceci laisserait donc penser que le courant de la charge à commuter n'a aucune influence sur le transfert de matière se produisant lors de la fermeture des contacts. Un courant important pourrait toutefois avoir un effet sur la phase d'ouverture des contacts, point qui nécessiterait de poursuivre l'étude.

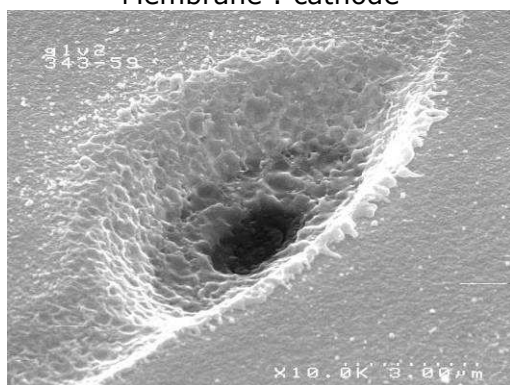
Lors des tests d'endurance menés sur le micro-interrupteur sous 14V/10mA, nous avons observé que la durée de vie est multipliée par 10 selon la polarité dans laquelle le test est effectué. Ainsi, si la membrane est polarisée négativement la durée de vie est réduite. Des observations MEB des contacts après cyclage révèlent que la cause de la défaillance est une érosion de la totalité de la couche d'or de l'anode. Si la polarité est inversée, l'érosion est moins rapide, en témoignent les clichés MEB ci-dessous.



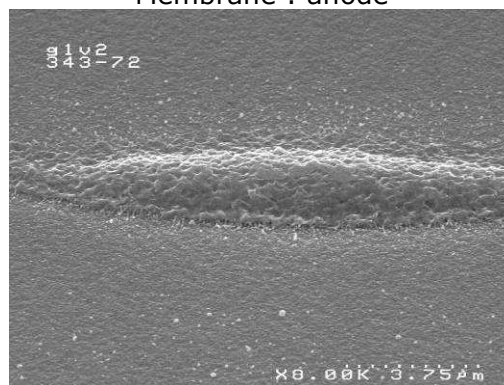
Membrane : cathode



Membrane : anode



Contact fixe : anode
(a)



Contact fixe : cathode
(b)

*Figure 151. Observation MEB des contacts après 16000 cycles.
(a) Cas où la membrane est la cathode. (b) Cas où le contact fixe est la cathode.*

Sur la Figure 151, les deux micro-interrupteurs étudiés ont subi le même nombre de cycles sous 14V/10mA (16000). Or nous observons clairement une érosion plus marquée dans le cas où la membrane joue le rôle de cathode. Suivant le mécanisme de transfert que nous avons mis en évidence, nous savons que les électrons sont émis depuis la cathode, d'autant plus facilement que β est élevé. Dans le cas où la cathode est la membrane, celle-ci possède des plots de contact qui présentent une arête vive, arête qui va donc engendrer une amplification locale du champ. Nous comprenons donc aisément que l'émission électronique va être amplifiée dans le cas où la membrane est la cathode alors qu'elle ne le sera pas dans le cas où la cathode est le contact fixe. Le contact fixe ne présente, en effet, aucun motif susceptible de favoriser l'émission électronique hormis sa rugosité. L'endurance accrue observée dans cette configuration n'est donc pas étonnante.

Conclusions et perspectives

Ou « Comment concevoir un micro-contact fiable »

L'approche initiale de ce travail de thèse était de tester de nouveaux matériaux de contact, dans le but d'améliorer la performance d'un micro-interrupteur réalisé en technologie MEMS. Une telle démarche est pertinente si l'intégration de ce nouveau matériau directement sur le produit final est aisée. Cependant, en technologie MEMS l'intégration d'un nouveau matériau dans le processus de fabrication est coûteuse, longue et complexe. Pour contourner cette difficulté nous avons alors développé un banc de test reproduisant fidèlement le fonctionnement d'un micro-interrupteur (cf. chapitre 3). La pertinence de cette approche n'a cependant pas pu être totalement évaluée, faute de temps. Mais parallèlement, une étude des mécanismes de défaillance du contact électrique a été menée directement sur le micro-interrupteur (cf. chapitre 2). L'analyse des résultats a permis d'identifier et de comprendre plusieurs mécanismes de dégradation du micro-contact. Un mécanisme de transfert de matière dirigé de l'anode vers la cathode n'a cependant pas pu être expliqué, malgré les observations similaires réalisées par d'autres groupes de recherche. L'utilisation non conventionnelle d'un AFM pour étudier à vitesse réduite les phases de commutation sous courant d'un micro-contact a alors permis de reproduire et comprendre ce phénomène (cf. chapitre 4).

Finalement, cette étude s'est orientée vers une thématique plus générique de compréhension des mécanismes de dégradation du micro-contact électrique. Cette thématique a été très peu considérée jusqu'à maintenant mais elle s'avère indispensable pour concevoir un micro-contact performant. Dans ce chapitre de conclusion nous allons voir les enseignements que nous pouvons tirer de ces travaux pour fiabiliser le micro-interrupteur actuel. Le tableau suivant récapitule les mécanismes de dégradation du contact que nous avons mis en évidence ainsi que leur origine.

Mécanisme de dégradation (matériau de contact)	Origine	Solution
Polymères de friction (Ru)	Etat de surface Propriétés catalytique du matériau	Nettoyage Désactivation des surfaces
Contamination carbonée (Ru & Au)	Etat de surface	Nettoyage
<i>Hillocks</i> (Au)	Contraintes du film Echauffement local	Empilement technologique Grandes surfaces de contact
Transfert de matière (Ru & Au)	Emission électronique U, β, Φ, K, T_f	Nouveau matériau (Φ, K, T_f) Forme du contact (β) Vitesse de commutation

Tableau 25. Mécanismes de dégradation du micro-contact électrique mis en évidence. Origines et solutions.

1. Fiabilisation à 3V/5V

Nous remarquons que les solutions pour s'affranchir des dégradations présentées dans le Tableau 25 reposent en majorité sur des améliorations du procédé actuel. Ainsi, les problèmes de contamination peuvent être résolus en procédant à un étuvage sous vide des surfaces juste avant packaging. Pour le ruthénium une étape de désactivation des surfaces, similaire à celle utilisée par les fabricants de relais reed pourrait être efficace aussi. En particulier, il a déjà été montré que l'oxyde de ruthénium, sous sa forme RuO_2

est conducteur [Chen2002] et il est utilisé comme matériau de contact dans le micro-relais développé par le Sandia National Laboratory [McGruer2006, Walker2009].

L'apparition des *hillocks* peut aussi être évitée en utilisant un empilement technologique dans lequel les coefficients de dilatation thermique des différents matériaux sont adaptés. L'utilisation d'un matériau *low stress* ou à contrainte résiduelle de traction peut empêcher la formation de ces monticules. Une technique utilisée dans les circuits intégrés consiste à utiliser des couches de passivation pour empêcher la formation de ces *hillocks*. Cette méthode n'est pas applicable dans notre cas, nous avons vu que le ruthénium jouait ce rôle de passivation en empêchant la formation des *hillocks*, mais une fois que cette couche commence à s'éroder des *hillocks* se forment en grande quantité.

Nous avons vu que ce phénomène était lié à l'échauffement engendré par le passage du courant. Une surface de contact plus grande serait donc utile, permettant de réduire la densité de courant et donc l'échauffement. Il est toutefois difficile d'augmenter la surface de contact, cette dernière ne pouvant pas être augmentée significativement avec le design actuel. Une meilleure dissipation thermique peut cependant être obtenue, en utilisant des matériaux plus épais pour le contact fixe, ou en réalisant des caissons enterrés en cuivre (comme sur les toutes premières versions du dispositif).

Nous avons vu qu'à « bas niveau » (3V, 5V), la durée de vie du micro-interrupteur était essentiellement limitée par la contamination de surface et l'apparition d'*hillocks*. En adoptant les recommandations proposées plus haut, la fiabilité du composant peut donc être améliorée, sans modifications majeures du dispositif. Une telle approche condamne cependant l'or comme matériau de contact à cause des problèmes de collage des contacts à l'issue du nettoyage. Le ruthénium, utilisé en matériau unique, se présente donc comme une solution pertinente. Pour cela un nettoyage de ses surfaces ou son oxydation sont indispensables. L'architecture du micro-interrupteur ne nécessite aucune modification : deux contacts en parallèle sont indispensables, ainsi qu'une souplesse latérale et une force de contact suffisante pour qu'ils se ferment correctement. Une atmosphère de fonctionnement sous gaz neutre et un packaging hermétique sont bien évidemment indispensables pour conserver l'état de surface initial des contacts.

2. Fiabilisation à 14V

Pour le calibre supérieur (14V), la principale cause de dégradation est le transfert de matière liée à l'émission électronique Fowler-Nordheim que nous avons mise en évidence. Notons aussi que ce phénomène a été observé lors des tests d'endurance sous 5V/1mA et que si nous nous affranchissons des dégradations énumérées dans le paragraphe précédent, ce transfert de matière se produira quand même. Il est donc le phénomène principal à prendre en compte, une fois que les dégradations d'ordre 1 du micro-contact seront résolues. Le paramètre contrôlant ce phénomène est la tension, et cette tension détermine alors le temps pendant lequel le phénomène se produit et donc la quantité de matière transférée à chaque commutation.

Pour limiter ce phénomène, plusieurs options s'offrent à nous. La première est d'augmenter la vitesse de commutation du micro-interrupteur, qui nous l'avons vu est faible en comparaison de ses homologues macroscopiques. C'est toutefois l'option la plus difficile à mettre en œuvre, la seule solution simple est de modifier le bras de levier de la membrane mais l'effet sera limité. La seconde amélioration à apporter est de supprimer

les reliefs présents sur la cathode, le phénomène étant très dépendant de β , le facteur d'amplification locale du champ. Réduire la rugosité des surfaces est technologiquement difficile, d'autant plus qu'elle est déjà extrêmement réduite, de l'ordre du nanomètre (il est peut-être possible de procéder à un rodage mécanique visant à écraser les aspérités de contact toutefois). La principale amélioration à apporter est de supprimer les plots de contact présents sur le contact mobile du micro-interrupteur. Nous avons vu, en effet, que lorsque ce contact mobile joue le rôle de cathode, la vitesse de transfert de matière est accrue. La réalisation de contacts arrondis (cf. Figure 152) est alors préférable et permet de limiter efficacement les effets de pointe, l'appareillage macroscopique sous vide l'a déjà prouvé. Notons toutefois que des contacts arrondis sont difficiles à réaliser en technologie MEMS.

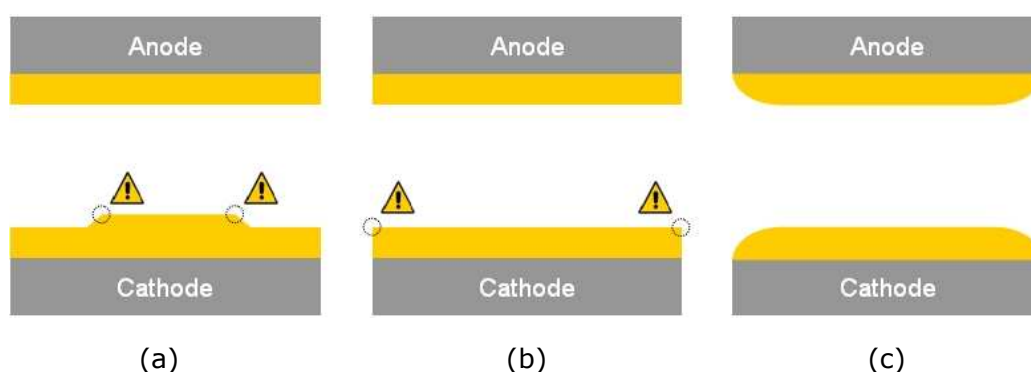


Figure 152. Géométries de contact. (a) Contact actuel. (b) Profil de Rogowski, dit « à champ constant ». (c) Profil adopté dans l'appareillage de commutation sous vide et adapté à notre problème.

D'un point de vue matériau de contact, nous avons vu dans le chapitre 4 quels étaient les paramètres à prendre en compte dans le choix d'un matériau plus performant. Les paramètres importants diffèrent en fonction que le matériau est utilisé en tant qu'anode ou cathode. Cependant dans une application industrielle (et d'autant plus en RF), il est difficilement envisageable d'imposer un sens de branchement du composant, même si ce n'est pas impossible. L'idéal est de trouver un matériau pouvant être efficace dans les deux polarités. L'appareillage électrique sous vide a alors recours à des alliages constitués d'un matériau très bon conducteur électrique et thermique (Ag, Cu...) et d'un matériau dur permettant de limiter la soudure des contacts (Cr, W, WC...). Le cahier des charges pour de tels dispositifs est différent du nôtre, car principalement basé sur l'apparition d'un arc électrique. Cependant de nombreuses améliorations peuvent être amenées à notre micro-interrupteur en s'inspirant de ce qui a été fait pour l'appareillage sous vide.

A ce stade il n'est pas envisageable de proposer un nouveau matériau de contact et être sûr qu'il améliorera la durée de vie du composant. Seuls des tests grandeur nature, sur le banc de test utilisé dans le chapitre 4 démontreront son efficacité. Il serait ainsi possible de classer les matériaux en fonction de leur travail de sortie, comme cela est fait dans [Zeitoun1991], mais l'état de surface des matériaux ainsi que l'atmosphère dans laquelle ils opèrent va modifier ce travail de sortie. Nous avons vu, en particulier dans le chapitre 4, comment l'humidité peut modifier l'émission électronique. Il serait donc judicieux d'imaginer des revêtements ou des traitements de surface permettant de

modifier le travail de sortie d'un matériau donné. L'utilisation de monocouches auto-assemblées ou greffées peut être une piste à explorer. Une telle approche a été largement utilisée dans le domaine des OLED par exemple (cf. Figure 153) [deBoer2005]. Un travail important sur les travaux de sortie a aussi été réalisé lorsque les grilles en silicium poly-cristallin ont été remplacées par des grilles métalliques dans les technologies CMOS.

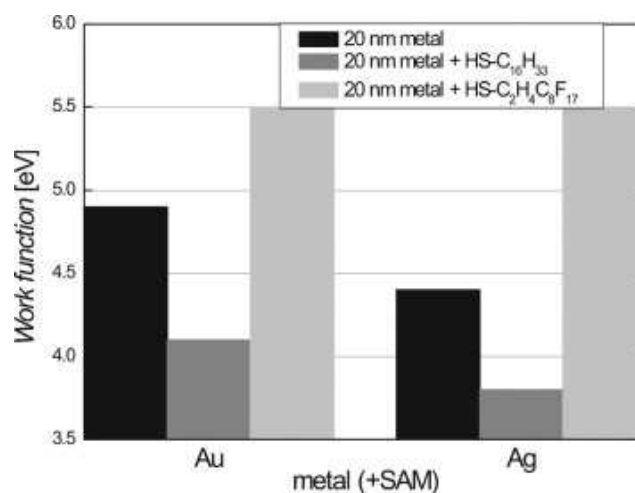


Figure 153. Augmentation du travail de sortie de l'or et de l'argent par dépôt d'une monocouche organique auto-assemblée. [deBoer2005]

Z. Yang montre dans sa thèse que la dégradation du micro-contact qu'il étudie est intégralement liée au phénomène d'émission électronique que nous avons étudié [Yang2008]. Il teste ensuite différents alliages d'or-nickel et montre qu'ils permettent une durée de vie accrue. Il attribue tout ce bénéfice à la dureté plus élevée de ces matériaux. Nous avons cependant vu que ce n'est pas un paramètre primordial, et il s'en aperçoit lui-même lorsqu'il constate que son matériau le plus dur n'est pas celui qui présente la meilleure durée de vie. Il serait donc intéressant de voir comment l'addition de nickel à l'or a modifié le travail de sortie, la température de fusion et la conductivité thermique. Il s'agit peut-être d'une piste intéressante.

Une autre approche pourrait consister à utiliser une couche de protection liquide, en nous inspirant des résultats que nous avons obtenus lors de l'étude sur l'influence de l'humidité. Une telle couche de protection pourrait limiter fortement l'émission électronique lorsque le contact est ouvert, mais permettre le passage du courant lorsque le contact est fermé (cf. Figure 154). Une telle technique a été largement utilisée dans les contacts macroscopiques bas niveau [Braunovic2006]. Dans notre cas, l'utilisation d'un fluide diélectrique ou électriquement chargé pourrait permettre d'écranter le champ électrique et donc limiter l'émission électronique, dépendant principalement du champ électrique local. La viscosité de ce fluide nécessite toutefois d'être finement ajuster pour éviter des problèmes d'adhésion par capillarité des deux membres du contact.

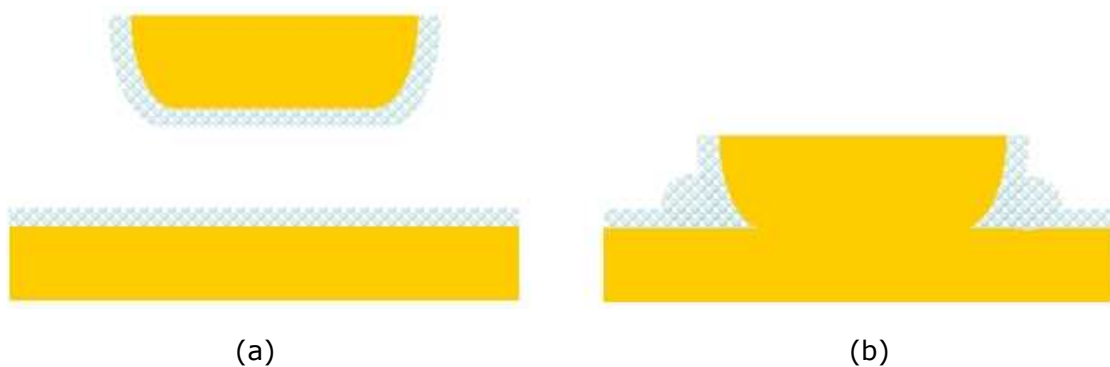


Figure 154. Proposition de limitation de l'émission électronique par mouillage des surfaces de contact avec un fluide.

Un autre paramètre peut avoir un effet non négligeable sur l'intensité de l'émission électronique : le gaz environnant. Nous avons vu que les électrons n'interagissent pas avec le gaz environnant, la distance inter-contacts étant trop réduite. Cependant le gaz interagit avec la surface de la cathode et peut modifier son émission en réduisant la surface émissive efficace [Zeitoun1988]. De plus il a été montré que l'hélium, par sa petite taille peut pénétrer dans les sites émissifs et créer des pièges à électrons, limitant l'émission électronique [Zeitoun1991, Kolesnychenko2000]. Tester une atmosphère de packaging différente, pourquoi pas de l'hélium, peut donc aussi avoir un intérêt.

Comme nous le remarquons, le champ d'investigation est large. De nombreuses améliorations peuvent être amenées pour limiter le transfert de matière qui est le principal mécanisme de dégradation des micro-contacts opérant en *hot switching*. La pertinence des améliorations proposées est aisément évaluable grâce au banc de test développé dans le chapitre 4 de ce manuscrit. A défaut d'avoir trouvé le matériau de contact miracle durant cette thèse (existe-t-il ?), nous avons mis en place un outil extrêmement performant qui permettra d'aller beaucoup plus loin que le simple choix d'un nouveau matériau de contact.

3. Et en conditions d'arc électrique ?

Nous l'avons vu dans le chapitre 4, lorsque le micro-interrupteur opère en conditions d'arc, un arc électrique instable (phase métallique) peut se développer. La phase gazeuse ne semble pas avoir lieu étant donné les faibles espacements inter-contacts mis en jeu (une telle affirmation nécessite des vérifications toutefois). Si nous souhaitons améliorer les performances du micro-interrupteur et l'utiliser pour commuter des courants plus élevés, nous ne serons alors plus dans les conditions du paragraphe précédent mais dans des conditions d'arc (métallique).

Dans de telles conditions, utiliser un matériau de contact différent pour éviter le régime d'arc n'est pas la solution, tous les matériaux présentant des tensions d'arc comprises entre 11V et 14V [Slade1999]. Il faudra donc dans ce cas considérer qu'un arc électrique se produit et éviter que l'érosion des contacts ne soit trop importante. Avec les faibles épaisseurs de matériaux utilisées dans le micro-interrupteur, nous ne pouvons être sûrs qu'il endure de nombreux cycles dans ces conditions. Une approche consisterait alors à repenser totalement le micro-interrupteur et le réaliser en exploitant le volume des matériaux plutôt que leur surface. Une approche en usinage de volume ou en technologie

LIGA²³ pourrait permettre de réaliser un dispositif dont l'épaisseur des contacts n'est plus limitée par l'épaisseur des couches déposées. Dans ce cas, un fonctionnement en conditions d'arc avec de l'érosion progressive des contacts est envisageable. Le procédé est, certes, moins intégrable dans une filière MEMS traditionnelle qui préfère l'usinage de surface que de volume, mais n'est pas inintéressant.

Une autre solution consisterait alors à séparer les phases de commutation en plusieurs phases, chacune se faisant hors conditions d'arc. Une telle approche a été utilisée et a déjà montré son efficacité [Yonezawa2004]. Une série de contacts équipés chacun d'une résistance permettant de maintenir le courant inférieur au courant d'arc permet de commuter le signal. Une électrode centrale se fermant en dernier et s'ouvrant en premier permet alors de conduire le signal avec une résistance faible (cf. chapitre 1). Des systèmes électromagnétiques plus complexes pourraient aussi être envisagés, en s'inspirant de ce qui existe dans les disjoncteurs et les contacteurs macroscopiques, pour dévier l'arc électrique et le rendre plus diffus ou l'éteindre plus rapidement. Le champ d'expérimentation est encore large et inexploré.

4. Et en RF ?

En vue d'une application en radiofréquences (RF), il est difficile de prévoir le comportement du contact. Z. Yang a procédé à des tests de commutation en courant alternatif (60Hz) et a montré que le phénomène de transfert de matière était quasiment négligeable [Yang2008]. Ceci est compréhensible, le phénomène étant directement lié au champ électrique il se produit alternativement dans une direction puis dans l'autre, menant à un transfert de matière globalement équilibré. En RF le phénomène sera probablement le même, et il se peut que la durée de vie soit plus élevée dans ces conditions qu'en courant continu.

Si le courant interrompu est plus important que durant nos tests, la croissance d'*hillocks* peut être amplifiée, tout comme d'éventuels phénomènes d'électromigration. Les phases d'ouverture sous fort courant peuvent, de plus, être très dommageables pour le contact. Des ponts fondus importants peuvent se créer, engendrant des modifications topographiques importantes. L'émission électronique peut aussi être amplifiée, l'effet Fowler-Nordheim étant très dépendant de la température des zones d'émission. De l'émission d'électrons par effet thermoïonique peut aussi être envisageable, venant amplifier le phénomène.

5. Et finalement

Comme nous le remarquons, la fiabilisation du micro-interrupteur pour des applications bas niveau est réalisable. Les modifications à apporter au procédé et à la structure du dispositif sont minimes et réalisables relativement aisément.

Pour des performances encore accrues, des investigations sont encore nécessaires mais nous avons développé durant ces travaux de thèse tous les outils pour tester rapidement la pertinence de nouveaux concepts. Ces concepts s'inspirent en grande partie du

²³ La technologie LIGA (acronyme allemand Lithografie, Galvanoformung, Abformung) permet de réaliser des motifs micrométriques très épais par remplissage électrolytique de moules obtenus par lithographie dans une résine épaisse.

domaine de la commutation sous vide, domaine qui, nous l'avons montré, est analogue à celui de la commutation à l'échelle nanométrique.

Si nous souhaitons réaliser un micro-interrupteur capable de commuter des signaux de puissance ou de supporter des arcs électriques, le problème est différent. Une approche plus complexe, impliquant des modifications radicales du principe de fonctionnement du dispositif ou des procédés de fabrication sont à envisager.

Références

- Abbott1933 Abbot, E. & Firestone, F. (1933), 'Specifying surface quantity - A method based on the accurate measurement and comparison', ASME Mech. Eng., vol. 55, 569-572.
- Abbott1978 Abbott, W. H. ; Campbell, W. E. (1978), 'Frictional polymers formation on precious metals – Experimental observations', IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 359-362.
- Agrawal2003 Agrawal, V.; Wood, R. & Mahadevan, R. (2003), 'MEMS microactuators located in interior regions of frames having openings therein and methods of operating the same', Brevet no. US 6,590,313.
- Almeida2006 Almeida, L.; Ishikawa, K.; Yu, Q.; Jackson, R. & Ramadoss, R. (2006), 'Experimental and theoretical investigation of contact resistance and reliability of lateral contact type ohmic MEMS relays', Reliability, Packaging, Testing and Characterization of MEMS/MOEMS V 6111 (1), 61110F.
- Angus1969 Angus, H. C. (1969), 'Adhesion between precious metals', Journal of Physics D: Applied Physics, 2 (6), 831-837.
- Arzt1998 Arzt, E. (1998), 'Size effects in materials due to microstructural and dimensional constraints: a comparative review', Acta Materialia, 46 (16), 5611-5626.
- Asay2008 Asay, D. B. ; Dugger, M. T. ; Ohlhausen, J. A. & Kim, S. H. (2008), 'Macro- to Nanoscale Wear Prevention via Molecular Adsorption', Langmuir, 24 (1), 155-159.
- Barriga2007 Barriga, J.; Fernández-Díaz, B.; Juarros, A.; Ahmed, S. & Arana, J. (2007), 'Microtribological analysis of gold and copper contacts', Tribology International, 40(10-12), 1526-1530.
- Beale1992 Beale, J. P. & Pease R. F. W. (1992), 'Apparatus for studying ultrasmall contacts', IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 45-49.
- Bilhaut2009 Bilhaut, L. ; Poulain, C. ; Anciant, R. & Duraffourg, L. (2009), 'Experimental Validation of a 2-D Constriction Resistance Model at the Microscale', IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 290-294.
- Boyer1988 Boyer, L.; Noel, S. & Houze, F. (1988), 'Determination of the effective contact radius between a conducting sphere and a thin metallic film', Journal of Physics D: Applied Physics, 21(3), 495.
- Braunovic2006 Braunović, M. ; Myshkin, N. K. ; Konchits, V. V. (2006), 'Electrical contacts - fundamentals applications and technology', CRC Press, 672 p.
- Brown2008 Brown, C. (2008), 'Impact of Environmental Conditions on the Contact Physics of Gold Contact RF Microelectromechanical Systems (MEMS) Switches', PhD. Thesis, North Carolina State University, 211 p.
- Bruckner1999 Brückner, R. & Lehn, J. M. (1999), 'Mécanismes réactionnels en chimie organique: Méthodes synthétiques, stéréochimie et réactions

- modernes', De Boeck Université, 614 p.
- Carslaw1959 Carslaw, H. S. & Jaeger, J. C. (1959), 'Conduction of heat in solids', Clarendon Press, 510 p.
- Chang1987 Chang, W. ; Etison, I. & Bogy, D. (1987), 'An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces', ASME J. Tribol., vol. 109, 257-263.
- Chang1997 Chang, W. (1997), 'An elastic-plastic contact model for a rough surface with an ion-plated soft metallic coating', Wear, 212(2), 229-237.
- Chen2002 Chen, R.; Huang, Y.; Chen, Y. & Chi, Y. (2002), 'Preparation and characterization of RuO₂ thin films from Ru(CO)₂(tmhd)₂ by metalorganic chemical vapor deposition', Thin Solid Films, 413(1-2), 85-91.
- Chen2007 Chen, L.; Lee, H.; Guo, Z. J.; McGruer, N. E.; Gilbert, K. W.; Mall, S.; Leedy, K. D. & Adams, G. G. (2007), 'Contact resistance study of noble metals and alloy films using a scanning probe microscope test station', Journal of Applied Physics, 102(7), 074910.
- Cheng2008 Cheng, J. ; Chen, S. ; Vianco, P. & Li, J. C. (2008), 'A new mechanism for *Hillock* formation over electrodeposited thin tin film', Electronic Components and Technology Conference, 472-477.
- Chow2007 Chow, L.L.W. Volakis, J.L. Saitou, K. Kurabayashi, K. (2007), 'Lifetime Extension of RF MEMS Direct Contact Switches in *Hot switching* Operations by Ball Grid Array Dimple Design', IEEE Electron Device Letters, vol. 28, no. 6, 479-481.
- Coutu2006 Coutu, R. A.; Kladitis, P.; Cortez, R.; Strawser, R. & Crane, R. (2006), 'Micro-Switches with Sputtered Au, AuPd, Au-on-AuPt, and AuPtCu Alloy Electric Contacts', IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, vol. 29, no. 2, 341-349.
- Coutu2009 Coutu, R. A. ; McBride, J. W. & Starman, L. A. (2009), 'Improved Micro-Contact Resistance Model that Considers Material Deformation, Electron Transport and Thin Film Characteristics', IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 295-299.
- CraigMiller1965 Craig Miller, H. & Farrall, G. A. (1965), 'Polarity Effect in Vacuum Breakdown Electrode Conditioning', Journal of Applied Physics, 36, 1338-1344.
- deBoer1999 de Boer, M. P. ; Knapp, J. A. ; Mayer, T. M. & Michalske, T. A. (1999), 'The role of interfacial properties on MEMS performance and reliability', Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, vol. 3825, 2-15.
- deBoer2005 de Boer, B. ; Hadipour, A. ; Mandoc, M. M. ; van Woudenberg, T. & Blom, P. W. M. (2005), 'Tuning of Metal Work Functions with Self-Assembled Monolayers', Advanced Materials, vol. 17, no. 5, 621-625.
- Dickrell2005 Dickrell, D. & Dugger, M. (2005), 'The Effects of Surface Contamination on Resistance Degradation of Hot-Switched Low-Force MEMS Electrical Contacts', IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 255-258.
- Dickrell2007 Dickrell, D. J. & Dugger, M. T. (2007), 'Electrical Contact Resistance Degradation of a hot-switched simulated metal MEMS contact', IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, vol. 30, no. 1, 75-80.

Dietrich1948	Dietrich, I. & Rüchardt, E. (1948), 'Feinwanderung an Abhebekontakten', Zeitschrift für Angewandte Physics, 1, 1-24.
Douglass1998	Douglass, M.R. (1998), 'Lifetime Estimates and Unique Failure Mechanisms of the Digital Micromirror Device (DMD)', Annual IEEE Reliability Physics Symposium, 9-16.
Douglass2003	Douglass, M. (2003), 'DMD reliability: a MEMS success story', Reliability, Testing and Characterization of MEMS/MOEMS II, 4980(1), 1-11.
Duke1967	Duke, C. B. & Alferieff, M. E. (1967), 'Field Emission through Atoms Adsorbed on a Metal Surface', The Journal of Chemical Physics, 46 (3), 923-937.
Elger2004	Elger, G.; Shiv, L.; Heschel, M.; Veneau, J. & Glukh, K. (2004), 'Low cost hermetic wafer-level packaging of magnetic proximity MEMS switches', International Symposium on Microelectronics.
Ennos1954	Ennos, A. E. (1954), 'The sources of electron-induced contamination in kinetic vacuum systems', British Journal of Applied Physics, 5 (1), 27-31.
Erts2002	Erts, D.; Löhmus, A.; Löhmus, R.; Olin, H.; Pokropivny, A. V.; Ryen, L. & Svensson, K. (2002), 'Force interactions and adhesion of gold contacts using a combined atomic force microscope and transmission electron microscope', Applied Surface Science, 188 (3-4), 460-466.
Etzion1975	Etzion, M. ; Blech, I. A. & Komem, Y. (1975), 'Study of conductive gold film lifetime under high current densities', Journal of Applied Physics, 46, 1455-1458.
Fortini2008	Fortini, A.; Mendelev, M. I.; Buldyrev, S. & Srolovitz, D. (2008), 'Asperity contacts at the nanoscale: Comparison of Ru and Au', Journal of Applied Physics, 104 (7), 074320.
Fowler1928	Fowler, R. H. & Nordheim, L. (1928), 'Electron Emission in Intense Electric Fields', Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 119 (781), 173-181.
Freund1999	Freund, J. ; Halbritter, J. & Hörber J. K. H. (1999), 'How dry are samples ? Water adsorption measured by STM', Microscopy research and technique, 44, 327-338.
Fursey2005	Fursey, G. (2005), Field Emission in Vacuum Microelectronics, Springer, 205 p.
Gale2004	Gale, W. F. & Tatemeier, T. C. (2004), 'Smithells Metal Reference Book', 8 ^{ème} édition, Butterworth-Heinemann, 2080 p.
Gil2000	Gil, A. ; Colchero, J. ; Luna, M. ; Gómez-Herrero, J. & Baró, A. M. (2000), 'Adsorption of Water on Solid Surfaces Studied by Scanning Force Microscopy', Langmuir 16 (11), 5086-5092.
Gilbert2008	Gilbert, K.W. ; Mall, S. ; Leedy, K.D. & Crawford, B. (2008), 'A nanoindenter based method for studying MEMS contact switch microcontacts', IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 137-144.
Goldsmith1998	Goldsmith, C. L. ; Yao, Z. ; Eshelman, S. & Denniston, D. (1998), 'Performance of Low-Loss RF MEMS Capacitive Switches', IEEE microwave and guided wave letters, vol. 8, no. 8, 269-271.
Goldsmith2007	Goldsmith, C. ; Maciel, J. & McKillop, J. (2007), 'Demonstrating reliability', IEEE Microwave Magazine, December 2007, 56-60.

-
- Greenwood1966 Greenwood, J. & Williamson, J. (1966), 'Contact of nominally flat surfaces', *Proc. Royal Soc. A.*, vol. 295, 257-263.
- Gueissaz2001 Gueissaz, F. & Piguët, D. (2001), 'The microreed, an ultra-small passive MEMS magnetic proximity sensor designed for portable applications', *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 269-273.
- Hansen1997 Hansen, K.; Laegsgaard, E.; Stensgaard, I. & Besenbacher, F. (1997), 'Quantized conductance in relays', *Physical Review B*, 56(4), 2208-2220.
- Hermance1958 Hermance, H. & Egan, T. (1958), 'Organic deposits on precious metal contacts', *The Bell System Technical Journal*, 37, 739-776.
- Hiltmann1997 Hiltmann, K.; Schmidt, B.; Sandmaier, H. & Lang, W. (1997), 'Development of micromachined switches with Increased Reliability', *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, 219-222.
- Hirata2000 Hirata, Y.; Fukushima, M.; Sano, T.; Ozaki, K. & Ohji, T. (2000), 'Micro-arc discharge phenomena', *Vacuum*, 59(1), 142-151.
- Hirata2007 Hirata, Y.; Ozaki, K.; Ikeda, U. & Mizoshiri, M. (2007), 'Field emission current and vacuum breakdown by a pointed cathode', *Thin Solid Films*, 515(9), 4247-4250.
- Holm1967 Holm, R. (1967), 'Electric Contacts: Theory and Application', Springer-Verlag, 516 p. (4^{ème} édition : 2000).
- Hourdakis2006 Hourdakis, E.; Simonds, B. J. & Zimmerman, N. M. (2006), 'Submicron gap capacitor for measurement of breakdown voltage in air', *Review of Scientific Instruments*, 77(3), 034702.
- Huang2006 Huang, J. & Huang, Q. (2006), 'Influence of the sticking effect on the contact resistance of a MEMS DC-contact switch', *Journal of Physics: Conference Series*, 34, 540-545.
- Hyman1999 Hyman, D. & Mehregany, M. (1999), 'Contact physics of gold microcontacts for MEMS switches', *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 22, 357-364.
- Hymite2005 Hymite GmbH (2005), 'Formic Acid (HCOOH) Assisted Soldering', *Rapport interne*, 3 p.
- iSuppli2009 Bouchaud, J. (2009), 'MEMS Market Brief, April 2009', iSuppli Corp., 10 p.
- iSuppli2009a Bouchaud, J. (2009), 'MEMS Market Brief, June 2009', iSuppli Corp., 14 p.
- Jang2007 Jang, B.; Tseng, P.; Huang, H.; Lee, S. & Fang, W. (2007), 'Characterization of the micro contact resistance using a novel on-chip apparatus', *Transducers & Eurosensors '07*, 1653-1656.
- Jang2008 Jang, B.; Tseng, P. & Fang, W. (2008), 'Characterization of micro-contact properties using a novel micromachined apparatus', *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18(5), 055020.
- Jemaa1986 Jemaa, N. B.; Queffelec, J. L. & Travers, D. (1986), 'Experimental and theoretical investigations on break arc voltage, duration, energy and erosion at low electrical level', *13th International Conference on Electrical Contacts*, 64-68.
- Jemaa1987 Jemaa, N. B.; Queffelec, J. L. & Haug, R. (1987), 'Theoretical and

- experimental laws of anodic and cathodic arc duration on break at low electrical level', Journal of Physics D: Applied Physics, 20(4), 468-475.
- Jensen2004 Jensen, B.; Huang, K.; Chow, L.; Saitou, K.; Volakis, J. & Kurabayashi, K. (2004), 'Asperity heating for repair of metal contact RF MEMS switches', IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1939-1942.
- Jensen2005 Jensen, B. D.; Huang, K.; Chow, L. L. & Kurabayashi, K. (2005), 'Low-force contact heating and softening using micromechanical switches in diffusive-ballistic electron-transport transition', Applied Physics Letters, 86(2), 023507.
- Jewett2007 Jewett, J. W. (2007), 'Physics for scientists and engineers with modern physics', Thomson Learning, 663 p.
- Johler2000 Johler, W. (2000), 'Optimized contact erosion by using electronegative gases in telecom relays', IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 83-93.
- Johler2001 Johler, W. (2001), 'Precious metal-reduced contact materials in telecom and signal relays', IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 104-116.
- Johnson1987 Johnson, K. L. (1987), 'Contact Mechanics', Cambridge University Press, 452 p.
- Ke2008 Ke, F. ; Miao, J. & Oberhammer, J. (2008), 'A ruthenium-based multi-metal contact RF MEMS switch with a corrugated diaphragm', IEEE/ASME Journal of Electromechanical Systems, vol. 17, no. 6, 1447-1459.
- Kim1990 KIM, J. Y. & Hummel, R. E. (1990), 'Hole and *hillock* formation in gold metallizations at elevated temperatures deposited in titanium, vanadium, and other barrier layers', physica status solidi (a), 122, 255-273.
- Kim2000 Kim, D.; Heiland, B.; Nix, W. D.; Arzt, E.; Deal, M. D. & Plummer, J. D. (2000), 'Microstructure of thermal *hillocks* on blanket Al thin films', Thin Solid Films 371(1-2), 278-282.
- Kim2008 Kim, J.-M. ; Lee, S. ; Baek, C.-W. ; Kwon, Y. & Kim, Y.-K. (2008), 'Cold and hot switching lifetime characterizations of ohmic-contact RF MEMS switches', IEICE Electronics Express, vol. 5, no. 11, 418-423.
- Klein1973 Klein, B. J. (1973), 'Electromigration in thin gold films', Journal of Physics F: Metal Physics, 3(4), 691-696.
- Knox1976 Knox, W. A. (1976), 'Contamination formed around a very narrow electron beam', Ultramicroscopy, 1(3), 175-80.
- Koch2003 Koch, D. (2003), 'Propriétés et utilisations du SF6 dans les appareils MT et HT', Cahier Technique Schneider Electric, no. 188, 23 p.
- Kolesnychenko2000 Kolesnychenko, O. Y.; Shklyarevskii, O. I. & van Kempen, H. (2000), 'Anomalous increase of the work function in metals due to adsorbed helium', Physica B: Condensed Matter, 284-288 (Part 2), 1257-1258.
- Komura1999 Komura, Y. ; Sakata, M. ; Seki, T. ; Kobayashi, K. ; Sano, K. ; Horiike, S. & Ozawa ; K. (1999), 'Micro Machined Relay for High Frequency Application', 47th Relay Conference.
- Koszewski2010 Koszewski, A. (2010), 'Reliability of RF MEMS switches', Thèse de l'Institut polytechnique de Grenoble, Septembre 2010.

-
- Kruglick1999 Kruglick, E. & Pister, K. (1999), 'Lateral MEMS microcontact considerations', J. of Micromech. Syst., 8, 264-271.
- Kwon2007 Kwon, H. ; Choi, D. J. ; Park, J.-H. ; Lee, H.-C. ; Park, Y.-H., Kim, Y.-D. ; Nam, H.-J. ; Joo, Y.-C. & Bu, J.-U. (2007), 'Contact materials and reliability for high power RF-MEMS switches', International Conference on Microelectromechanical Systems, 231-234.
- Kwon2008 Kwon, H.; Jang, S.; Park, Y.; Kim, T.; Kim, Y.; Nam, H. & Joo, Y. (2008), 'Investigation of the electrical contact behaviors in Au-to-Au thin-film contacts for RF MEMS switches', Journal of Micromechanics and Microengineering 18(10), 105010.
- LaCombe1982 LaCombe, D. J. Dening, D. C. Christou, A. (1982), 'A New Failure Mechanism in thin Gold Films at Elevated Temperatures', 20th Annual Reliability Physics Symposium, 81-87.
- Lahiri1994 Lahiri, S.K. (1994), 'Mechanical stress induced void and *hillock* formations in thin films', IEEE International Workshop on Memory Technology, Design and Testing, 22-25.
- Lampen2004 Lampen, J. ; Majumder, S. ; Morrison, R. ; Chaudhry, A. & Maciel, J. (2004), 'A wafer-capped, high-lifetime ohmic MEMS RF switch', International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, vol. 14, no. 4, 338-344.
- Langer1996 Langer, G.; Hartmann, J. & Reichling, M. (1997), 'Thermal conductivity of thin metallic films measured by photothermal profile analysis', Review of Scientific Instruments, 68(3), 1510-1513.
- Lau2009 Lau, Y. Y. & Tang, W. (2009), 'A higher dimensional theory of electrical contact resistance', Journal of Applied Physics, 105(12), 124902.
- Lee2001 Lee, R.; Chung, H. & Chiou, Y. (2001), 'Arc erosion behavior of silver electric contacts in a single arc discharge across a static gap', IEE Proc. Sci. Meas. Technol., 148, vol.1, 8-14.
- Lee2004 Lee, H.; Leung, C.; Shi, J. & Chang, S. (2004), 'Micro-electro-mechanical relays – design concepts and process demonstrations', IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 242-247.
- Lee2009 Lee, J.-O. ; Kim, M.-W. ; Ko, S.-D. ; Kang, H.-O. ; Bae, W.-H. ; Kang, M.-H. ; Kim, K.-N. ; Yoo, D.-E. & Yoon, J.-B. (2009), '3-Terminal Nanoelectromechanical Switching Device in Insulating Liquid Media for Low Voltage Operation and Reliability Improvement', IEEE International Electron Device Meeting, 227-230.
- Leung2003 Leung, T. C.; Kao, C. L.; Su, W. S.; Feng, Y. J. & Chan, C. T. (2003), 'Relationship between surface dipole, work function and charge transfer: Some exceptions to an established rule', Phys. Rev. B, 68(19), 195408.
- Liu2001 Liu, Y.; Li, X.; Abe, T.; Haga, Y. & Esashi, M. (2001), 'A thermomechanical relay with microspring contact array', IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 220-223.
- Lory2009 Lory, D. (2009), 'Caractérisation de matériaux de contact pour commutateurs en technologie MEMS', Rapport de stage 2^{ème} année Phelma, Institut polytechnique de Grenoble.
- Ma2004 Ma, Q. (2004), 'Integrated microsprings for high speed switches', Brevet no. US 6,753,747.

Ma2007	Ma, Q.; Tran, Q.; Chou, T. A.; Heck, J.; Bar, H.; Kant, R. & Rao, V. (2007), 'Metal contact reliability of RF MEMS switches', Reliability, Packaging, Testing and Characterization of MEMS/MOEMS VI, 6463(1), 646305.
Maciel2004	Maciel, J.; Majumder, S.; Morrison, R. & Lampen, J. (2004), 'Lifetime characteristics of ohmic MEMS switches', Reliability, Testing and Characterization of MEMS/MOEMS III, 5343(1), 9-14.
Magfusion2004	Magfusion, Inc. (2004), 'A magnetic MEMS-based RF relay', Microwave Journal January 2004, 4 p.
Maissel1970	Maissel, L. I. (1970), 'Handbook of Thin Film Technology', McGraw Hill, 800 p.
Majumder2001	Majumder, S.; McGruer, N.; Adams, G. G.; Zavracky, P.; Morrison, R. & Krim, J. (2001), 'Study of contacts in an electrostatically actuated microswitch', Sensors and Actuators A, 93, 19-26.
Majumder2003	Majumder, S.; Lampen, J.; Morrison, R. & Maciel, J. (2003), 'A Packaged, High-Lifetime Ohmic MEMS RF Switch', IEEE MTT-S International Microwave Symposium digest, vol. 3, 1935-1938.
Mayadas1968	Mayadas, A. F. (1968), 'Intrinsic Resistivity and Electron Mean Free Path in Aluminum Films', Journal of Applied Physics, vol. 39, no. 9, 4241-4245.
McGruer2006	McGruer, N.E. ; Adams, G.G. ; Chen, L. ; Guo, Z.J. & Du, Y. (2006), 'Mechanical, Thermal, and Material Influences on Ohmic-Contact-Type MEMS Switch Operation', IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 230-233.
McKillop2006	McKillop, J.; Fowler, T.; Goins, D. & Nelson, R. (2006), 'Design, Performance and Qualification of a Commercially Available MEMS Switch', 36th European Microwave Conference, 1399-1401.
MCNC1999	Goodwin-Johansson, S. (1999), 'Arc resistant high voltage micromachined electrostatic switch', Brevet no. US 6,057,520.
Mikrajuddin1999	Mikrajuddin, A.; Shi, F.; Kim, H. & K., K. O. (1968), 'Size-dependent electrical constriction resistance for contacts of arbitrary size: from Sharvin to Holm limits', Materials Science in Semiconductor Processing 2, 321-327(7).
Morris2003	Morris, A. S. ; Cunningham, S. ; Dereus, D. ; Schropfer, G. (2003), 'High-Performance Integrated RF-MEMS: Part 1- The Process', 33rd European Microwave Conference, 21-24.
Müller1941	Müller, E. W. (1941), 'Abreißen adsorbierter Ionen durch hohe elektrische Feldstärken', Naturwissenschaften, vol. 29, no. 35, 533-534.
Müller1966	Müller, E. W. (1966), 'Field Ion Microscopy', The Physics Teacher, 4(2), 53-56.
Nathanson1967	Nathanson, H.C. ; Newell, W.E. ; Wickstrom, R.A. & Davis, J.R. (1967), 'The resonant gate transistor', IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 14, no. 3, 117-133.
Neufeld1995	Neufeld, C. & Rieder, W. (1995), 'Carbon Contamination of Contacts Due to Organic Vapors', IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 18, 399-404.
Newman2008	Newman, H.S. ; Ebel, J.L. ; Judy, D. & Maciel, J. (2008), 'Lifetime Measurements on a High-Reliability RF-MEMS Contact Switch', IEEE

	Microwave and Wireless Components Letters, vol. 18, no.2, 100-102.
Norberg2006	Norberg, G. ; Dejanovic, S. ; Hesselbom, H. (2006), 'Contact resistance of thin metal film contacts', IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol.29, no. 2, 371-378.
NovaM2008	NOVAMEMS, Rapport d'essais interne, 2008.
Omron2008	Brochure descriptive du micro-relais MEMS Omron, ref. 2SMES-01, lien : http://www.components.omron.com/components/web/PDFLIB.nsf/0/AAA9A30064393CA862574F80078809C/\$file/SB_RFMEMS-02+Sales+Brochure.pdf
Ono2000	Ono, T.; Sim, D. Y. & Esashi, M. (2000), 'Micro-discharge and electric breakdown in a micro-gap', Journal of Micromechanics and Microengineering 10(3), 445-451.
Palego2009	Palego, C. ; Deng, J. ; Peng, Z. ; Hadler, S. ; Hwang, J. ; Forehand, D. ; Goldsmith, C. ; Johnston, I. ; Sampath, S. & Datta, A. (2009), 'Robustness of RF MEMS capacitive switches with molybdenum membranes', IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 57, no.12, 3262-3269.
Patton2005	Patton, S. & Zabinski, J. (2005), 'Fundamental studies of Au contacts in MEMS RF switches', Tribology Letters, 18, 215-230.
Pennebaker1969	Pennebaker, W. B. (1969), 'Hillock Growth and Stress Relief in Sputtered Au Films', Journal of Applied Physics, 40(1), 394-400.
Petersen1979	Petersen, K. (1979), 'Micromechanical membrane switches on silicon', IBM Journal of Research and Development, 23, no. 4, 376-385.
Picot2000	Picot, P. (2000), 'La coupure du courant électrique dans le vide', Cahier technique Schneider Electric, no. 198, 36 p.
Pruitt2004	Pruitt, B.L. ; Park, W.-T. & Kenny, T.W. (2004), 'Measurement system for low force and small displacement contacts', Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 13, no. 2, 220-229.
Read2009	Read, M. B. ; Lang, J. H. ; Slocum, A. H. & Martens, R. (2009), 'Contact Resistance in Flat Thin Films', IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 300-306.
Reagor1981	Reagor, B. & Seibles, L. (1981), 'Structural Analysis of Deuterated and Nondeuterated Frictional Polymers Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Pyrolysis Gas Chromatography Mass Spectroscopy', IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology CHMT-4, NO. 1, 102-108.
Rebeiz2003	Rebeiz, G. M. (2003), 'RF MEMS: Theory, Design and Technology', J. Wiley and Sons, 483 p.
Receveur2006	Receveur, R.; Zickar, M.; Marxer, C.; Larik, V. & de Rooij, N. (2006), 'Wafer level hermetic package and device testing of a SOI-MEMS switch for biomedical applications', J. Micromech. Microeng., 16, 676-683.
Rezvanian2008	Rezvanian, O.; Brown, C.; Zikry, M. A.; Kingon, A. I.; Krim, J.; Irving, D. L. & Brenner, D. W. (2008), 'The role of creep in the time-dependent resistance of Ohmic gold contacts in radio frequency microelectromechanical system devices', Journal of Applied Physics, 104(2), 024513.

Rieder2000	Rieder, W.F. (2000), 'Low current arc modes of short length and time: a review', IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. 23, no. 2, 286-292.
Rowe2009	Rowe, S. W., Cours interne Schneider Electric, mise à jour 2010.
Ruan2001	Ruan, M.; Shen, J. & Wheeler, C. B. (2001), 'Latching microelectromagnetic relays', Sensors and Actuators A: Physical, 91(3), 346-350.
Sader1999	Sader, J. E.; Chon, J. W. M. & Mulvaney, P. (1999), 'Calibration of rectangular atomic force microscope cantilevers', Review of Scientific Instruments, 70(10), 3967-3969. Calibration online : http://www.ampc.ms.unimelb.edu.au/afm/calibration.html
Sakata1999	Sakata, M. ; Komura, Y. ; Seki, T. ; Kobayashi, K. ; Sano, K. & Horiike, S. (1999), 'Micromachined Relay which Utilizes Single Crystal Silicon Electrostatic Actuator', 12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 21-24.
Schlaak2002	Schlaak, H. (2002), 'Potentials and Limits of Micro-Electromechanical Systems for Relays and Switches', International Conference on Electrical Contacts.
Sekatskii2001	Sekatskii, S. K. & Letokhov, V. S. (2001), 'Electron tunneling time measurement by field-emission microscopy', Phys. Rev. B 64(23), 233311.
Seki2006	Seki, T.; Uno, Y.; Narise, K.; Masuda, T.; Inoue, K.; Sato, S.; Sato, F.; Imanaka, K. & Sugiyama, S. (2006), 'Development of a large-force low-loss metal-contact RF MEMS switch', Sensors and Actuators A: Physical, 132(2), 683-688.
Sharvin1965	Sharvin, Y. V. (1965), 'A Possible Method for Studying Fermi Surfaces', Soviet Physics JETP, vol. 21, 655-657.
Shi2005	Shi, Y. & Kim, S. (2005), 'A lateral, self-cleaning, direct contact MEMS switch', IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 195-198.
Shinchi1999	Shinchi, A.; Imada, Y.; Honda, F. & Nakajima, K. (1999), 'Electric contact surface of Pd-plated metal in organic gas/air atmospheres', Wear 230(1), 78-85.
Slade1999	Slade, P. G. (1999), Electrical Contacts : Principles and Applications, CRC Press, 1104 p.
Slade2002	Slade, P. & Taylor, E. (2002), 'Electrical breakdown in atmospheric air between closely spaced (0.2 μm -40 μm) electrical contacts', IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 25(3), 390-396.
Sondheimer1952	Sondheimer, E. H. (2001), 'The mean free path of electrons in metals', Advances in Physics, vol. 50, no. 6, 499-537 (originally published in vol. 1, 1952)
Song2008	Song, J. & Srolovitz, D. J. (2008), 'Mechanism for material transfer in asperity contact', Journal of Applied Physics, 104(12), 124312.
Tan2007	Tan, C. M. & Roy, A. (2007), 'Electromigration in ULSI interconnects', Materials Science and Engineering: R: Reports, 58(1-2), 1-75.
Teravicta2003	Nelson, R. D. (2003), 'Device adapted to pull a cantilever away from

a contact structure', Brevet no. US 6,646,215.

Teravicta2006 Nelson, R. D. ; Flynn, W. G. & Goins, D. A. (2006), 'Plate based microelectromechanical switch having a three-fold relative arrangement of contact structures and support arms', Brevet no. US 7,119,943.

Théoleyre1998 Théoleyre, S. (1998), 'Les techniques de coupure en MT', Cahier Technique Schneider Electric, no. 193, 36 p.

Thielicke2003 Thielicke, E. & Obermeier, E. (2003), 'A Fast Switching Surface Micromachined Electrostatic Relay', International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, 899-902.

Timsit1983 Timsit, R. (1983), 'On the Evaluation of Contact Temperature from Potential Drop Measurements', IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, vol. 6, no. 1, 115-121.

Timsit2008 Timsit, R. (2008), 'Constriction resistance of thin-film contacts', IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 332-336.

Torres1999 Torres, J. & Dhariwal, R. (1999), 'Electric field breakdown at micrometre separations', Nanotechnology, 10, 102-107.

Toth2009 Toth, M.; Lobo, C. J.; Lysaght, M. J.; Vladár, A. E. & Postek, M. T. (2009), 'Contamination-free imaging by electron induced carbon volatilization in environmental scanning electron microscopy', Journal of Applied Physics, 106(3), 034306.

Tringe2003 Tringe, J.; Uhlman, T.; Oliver, A. & Houston, J. (2003), 'A single asperity study of Au/Au electrical contacts', Journal of Applied Physics, 93, 4661-4669.

Tsong1991 Tsong, T. T. (1991), 'Effects of an electric field in atomic manipulations', Phys. Rev. B, 44(24), 13703-13710.

Uenishi1992 Uenishi, Y. ; Yasuda, K. & Hara, S. (1992), 'Precise stiffness measurement system for micromechanical structures', International journal of the Japan Society for Precision Engineering, vol. 26, no. 2, 160-161.

Uno2009 Uno, Y. ; Narise, K. ; Masuda, T. ; Inoue, K. ; Adachi, Y. ; Hosoya, K. ; Seki, T. & Sato, F. (2009), 'Development of SPDT-structured RF MEMS switch', International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 541-544.

Walker2009 Walker, M. J. (2009), 'Impact of Stringently Controlled Vacuum Environments with in situ Surface Cleaning on Contact Resistance of Au and Ru Based Radio Frequency Microelectromechanical Switches' PhD. Thesis, North Carolina State University, 122 p.

Wallash2003 Wallash, A. J. & Levit, L. (2003), 'Electrical breakdown and ESD phenomena for devices with nanometer-to-micron gaps', Reliability, Testing and Characterization of MEMS/MOEMS II, 4980(1), 87-96.

Watson1947 Watson, J. H. L. (1947), 'An Effect of Electron Bombardment upon Carbon Black', Journal of Applied Physics, 18(2), 153-161.

Weber2005 Weber, A. ; Lang, J. & Slocum, A. (2005), 'A Low Contact Resistance MEMS-Relay', Technical report, MIT, 1 p.

Wexler1966 Wexler, G. (1966), 'The size effect and the non-local Boltzmann transport equation in orifice and disk geometry', Proceedings of the Physical Society, 89(4), 927-941.

Wright1999	Wright, J. & Tai, Y. (1999), 'Magnetostatic MEMS relays for the miniaturisation of brushless DC motor controllers', IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 594-599.
WTC2007	Bouchaud, J. & Knoblich, B. (2007), 'RF MEMS Switches Deliver on Early Promise', Sensors & Transducers Journal, vol.86, no. 12, 1802-1808.
Yang2008	Yang, Z. (2008), 'Contact Material Optimization and Contact Physics in Metal-contact Microelectromechanical Systems (MEMS) Switches', Ph.D Thesis, North Carolina State University, 196 p.
Yang2009	Yang, Z. ; Lichtenwalner, D.J. ; Morris, A.S. ; Krim, J. & Kingon, A.I. (2009), 'Comparison of Au and Au-Ni Alloys as Contact Materials for MEMS Switches', Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 18, no. 2, 287-295.
Yokogawa1973	Yokogawa, T. & Kawagita, C. (1973), 'High reliability reed switches with rhodium plated contacts', 21st Annual National Relay Conference, 131-137.
Yokogawa1986	Yokokawa, T.; Yano, T.; Kawakita, C.; Hinohara, K. & Nagai, A. (1986), 'A study on the surface deactivation treatment of rhodium-plated contact reed switches', IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, vol. CHMT-9, no. 1, 124-127.
Yonezawa2004	Yonezawa, Y.; Wakatsuki, N.; Satoh, Y.; Nakatani, T. & Sawa, K. (2004), 'Non Arcing Electric Contact Device Using the MEMS Multi Electrodes', IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 236-241.
Yunus2008	Yunus, E.; McBride, J. & Spearing, S. (2008), 'Improving the contact resistance at low force using gold coated carbon nanotube surfaces', International Conference on Electrical Contacts, 507-513.
Zavracky1997	Zavracky, P.; Majumder, S. & McGruer, N. (1997), 'Micromechanical switches fabricated using nickel surface micromachining', Journal of Microelectromechanical Systems, 6 (1), 3-9.
Zeitoun1988	Zeitoun-Fakiris, A. & Juttner, B. (1988), 'The effect of gases on the emission currents from metallic micropoints in ultra-high vacuum', Journal of Physics D: Applied Physics, 21(6), 960-967.
Zeitoun1991	Zeitoun-Fakiris, A. (1991), 'Isolation sous vide', Techniques de l'ingénieur, 40 p.
Zhang2006	Zhang, Q. G. ; Cao B. Y. ; Zhang X. ; Fjuii M. ; Takahashi K. (2006), 'Influence of grain boundary scattering on the electrical and thermal conductivities of polycrystalline gold nanofilms', Physical Review B, vol. 74, 134109.
Zhang2008	Zhang, B. ; Yu, Q. ; Tan, J. & Zhang, G. (2008), 'Electric Current-induced Failure of 200-nm-thick Gold Interconnects', Journal of Materials Sciences and Technology, 24(06), 895-898.
Zhao2003	Zhao, Y.; Wang, L. & Yu, T. (2003), 'Mechanics of adhesion in MEMS-a review', Journal of Adhesion Science and Technology, 17, 519-546.
Zurlev2003	Zurlev, D. N. & Forbes, R. G. (2003), 'Field ion emission: the effect of electrostatic field energy on the prediction of evaporation field and charge state', Journal of Physics D: Applied Physics, 36(17), L74-L78.

Publications durant la thèse

- Vincent2008 Vincent, M. ; Chiesi, L. ; Fourrier, J.-C. ; Garnier, A. ; Grappe, B. ; Lapiere, C. ; Coutier, C. ; Samperio, A. ; Paineau, S. ; Houzé, F. & Noël, S. (2008), 'Electrical contact reliability in a magnetic MEMS switch', 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 145-150.
- Vincent2009 Vincent, M. ; Chiesi, L. ; Rousset, P. ; Lapiere, C. ; Poulain, C. ; Carbone, L. ; Houzé, F. & Delamare, J. (2009), 'An original apparatus for endurance testing of MEMS electrical contact materials', 55th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 285-289.
- Vincent2010 Vincent, M. ; Rowe, S. W. ; Poulain, C. ; Chiesi, L. ; Delamare, J. & Houzé, F. (2010), 'Field emission and material transfer in MEMS switches electrical contacts', en préparation pour Applied Physics Letters.
- Coutier2009 Coutier, C. ; Chiesi, L. ; Garnier, A. ; Fourrier, J.-C. ; Lapiere, C. ; Trouillon, M. ; Grappe, B. ; Vincent, M. ; Samperio, A. ; Borel, S. ; Dieppedale, C. ; Lorent, E. & Sibuet, H. (2009), 'A new magnetically actuated switch for precise position detection', Transducers'09, 861-864.

Annexe 1 – Mesures au vibromètre laser à effet Doppler sur le micro-interrupteur

- Objectifs :
- (1) Mesurer la vitesse de la membrane lors de la commutation
 - (2) Mesurer le temps de commutation du micro-interrupteur

1. Principe de la mesure

Extrait du manuel d'utilisation du Polytec MSA400 :

- (1) An excitation (shaker, loudspeaker, hammer, etc.) causes the object under investigation to vibrate.
- (2) The measurement beam from the interferometer in the scanning head is positioned to a scan point on the object by means of mirrors and is scattered back.
- (3) The backscattered laser light interferes with the reference beam in the scanning head
- (4) A photo detector records the interference.
- (5) A decoder in the controller provides a voltage which is proportional to the velocity of the vibration parallel to the measurement beam.
- (6) The voltage is digitized and processed as vibrometer signal.

La Figure 155 ci-dessous est un schéma de principe du vibromètre laser utilisé.

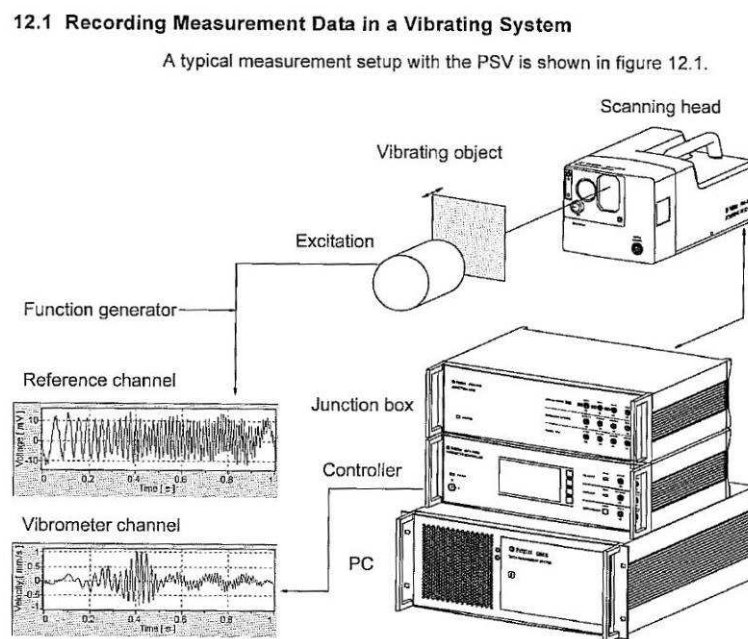


Figure 12.1: Principle of data recording with the PSV

Figure 155. Schéma de principe du vibromètre (Polytec MSA400).

2. Montage expérimental

Le montage expérimental est présenté sur la Figure 156 ci-dessous.

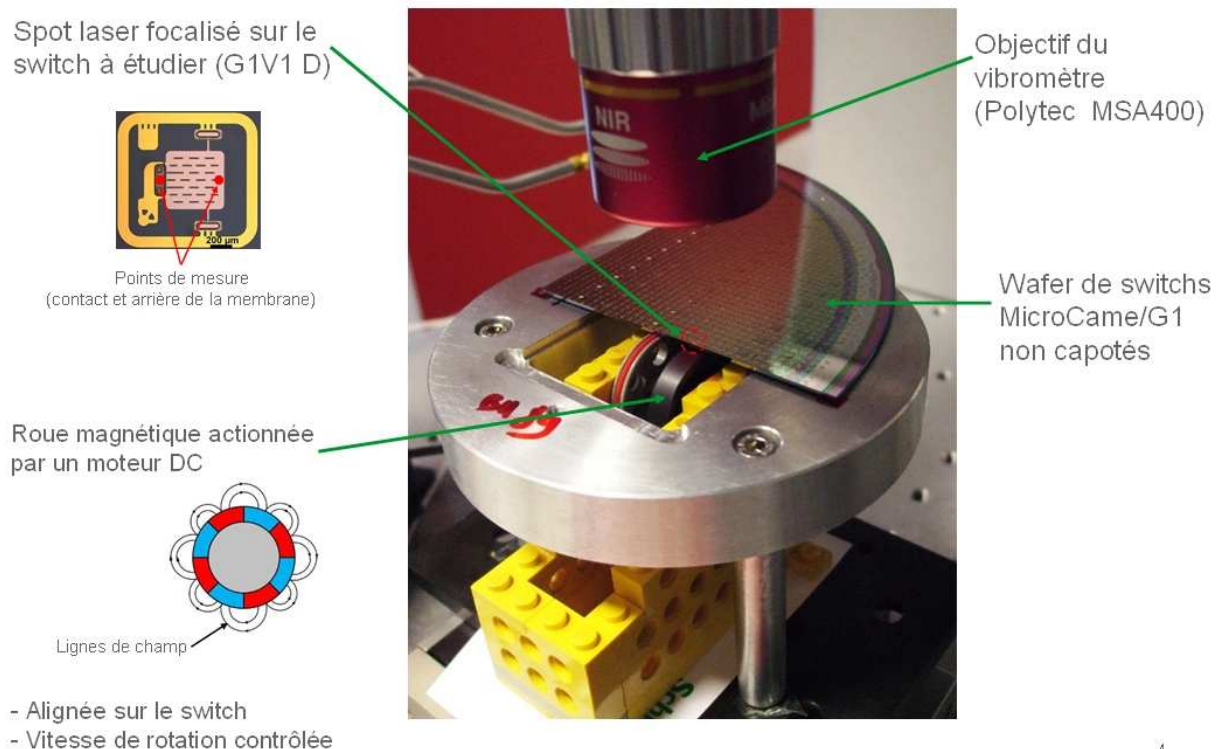


Figure 156. Montage expérimental.

3. Actionnement du micro-interrupteur

L'actionnement choisi est un actionnement par une roue composée d'une alternance de pôles magnétiques. La membrane du micro-interrupteur s'alignant dans le sens des lignes de champ, cette alternance de pôles permet de commuter le micro-interrupteur. La vitesse de rotation de la roue permet de contrôler la fréquence de commutation.

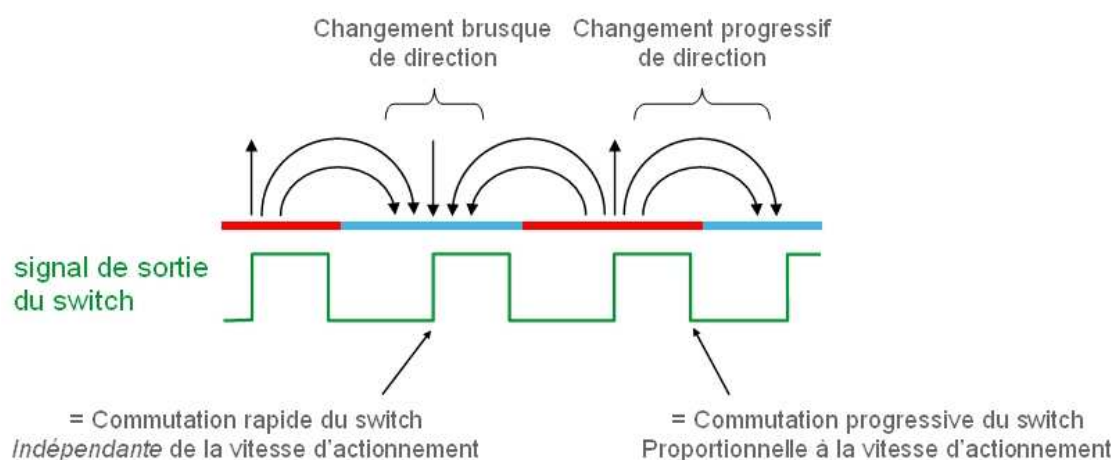


Figure 157. Principe de la commutation par roue magnétique.

4. Mesures temporelles

Les mesures sont effectuées à trois fréquences de commutation différentes : 12, 32 et 38 Hz. Les résultats des mesures de vitesse de déplacement vertical sont présentés sur la Figure 158.

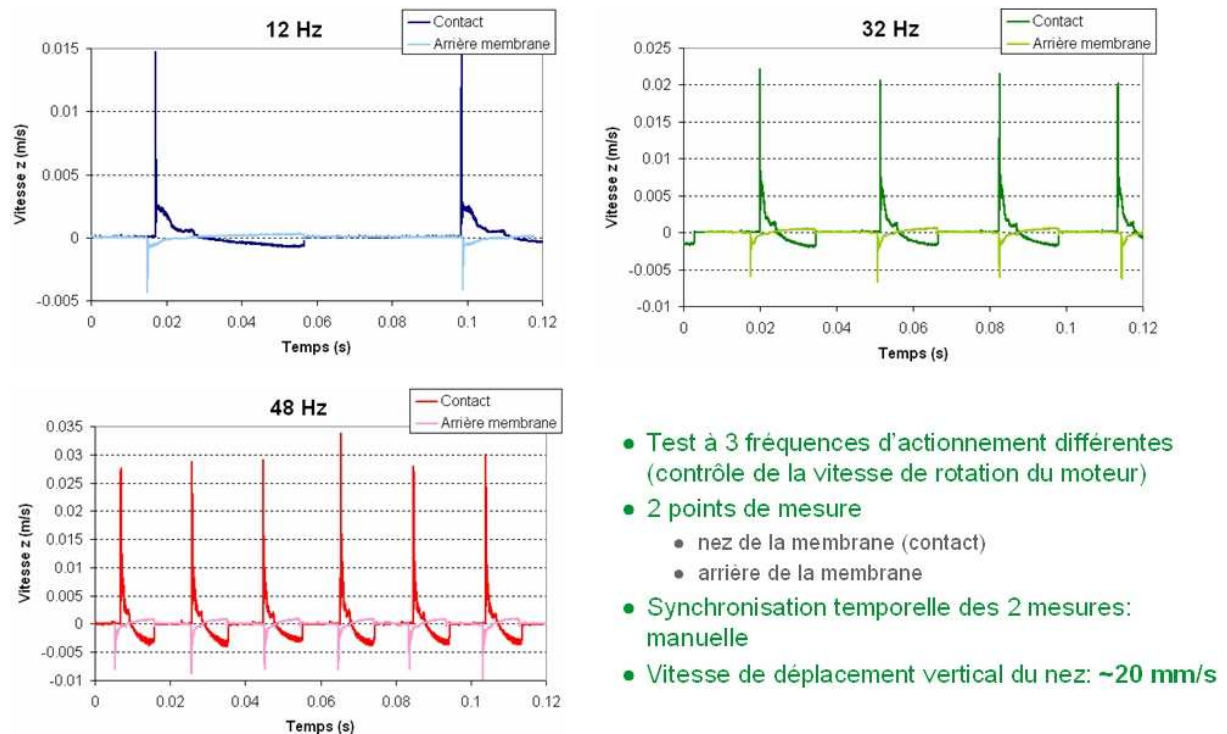


Figure 158. Résultats des mesures de vitesse de déplacement vertical du contact mobile et de l'arrière de la membrane.

Ces mesures nous fournissent l'information que le contact mobile se déplace avec une vitesse verticale d'environ 20 mm/s. Le détail d'un cycle de commutation à 32Hz est présenté en Figure 159.

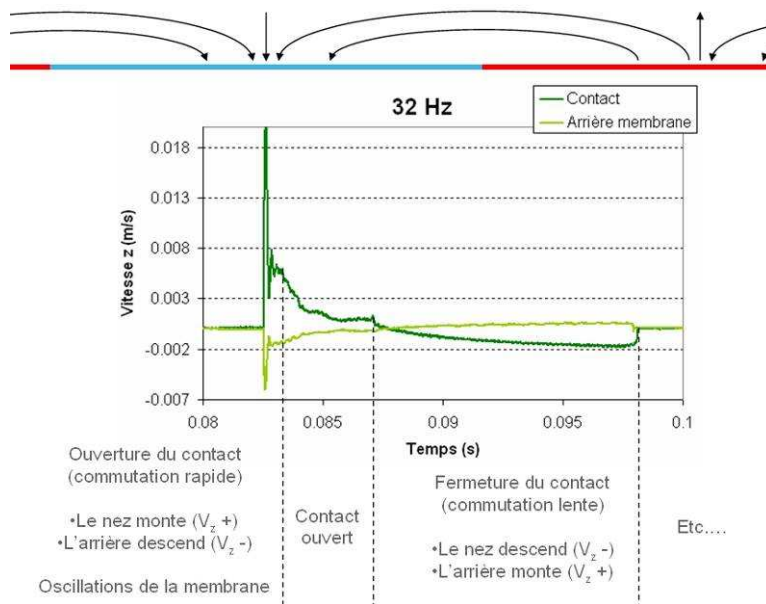


Figure 159. Détail d'un cycle de commutation à 32Hz.

5. Intégration des mesures

En intégrant les mesures obtenues, nous pouvons remonter au déplacement vertical de la membrane. Les résultats sont présentés sur la Figure 160 et l'intégration du cycle présenté en Figure 159 est alors présentée sur la Figure 161.

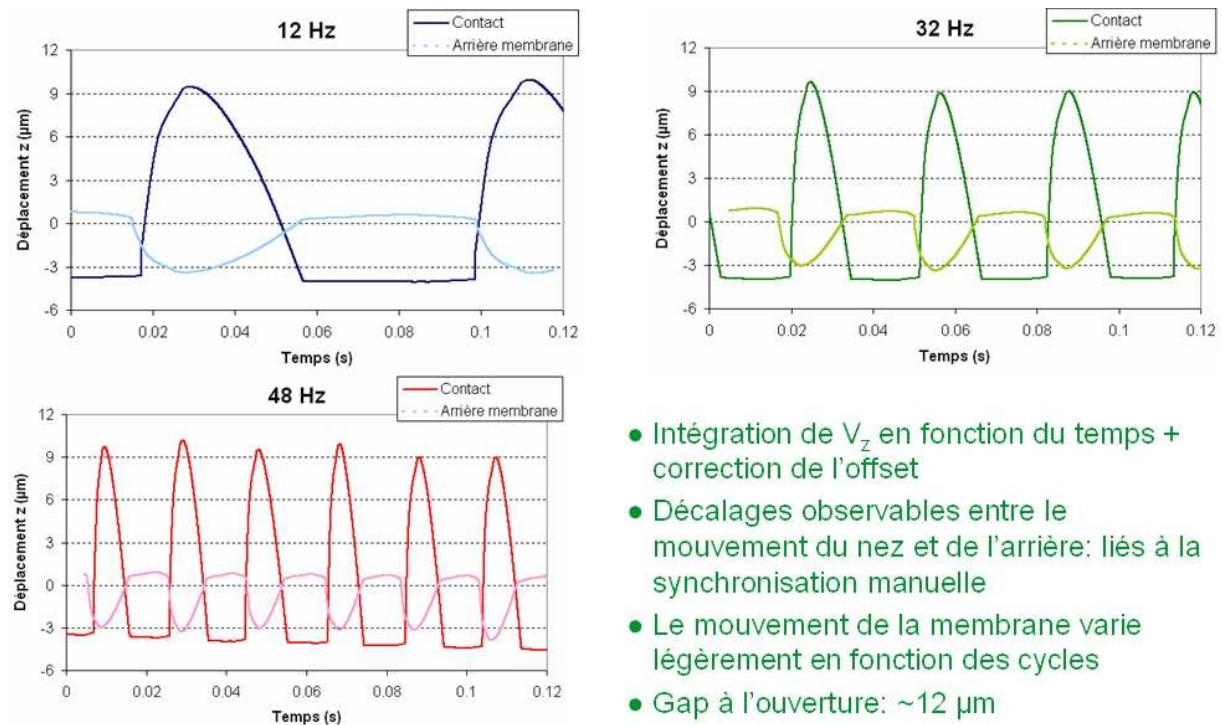


Figure 160. Intégration des vitesses mesurées : déplacement vertical de la membrane.

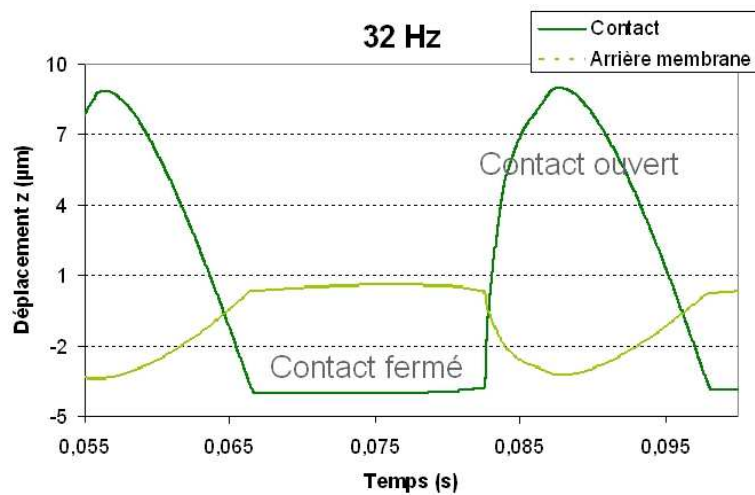


Figure 161. Détail d'un cycle de commutation à 32Hz.

6. Extraction du temps de commutation

Il est alors possible d'extraire le temps de commutation du micro-interrupteur, en mesurant sur les graphes précédents la durée pendant laquelle la membrane est en mouvement. Les résultats sont présentés sur la Figure 162.

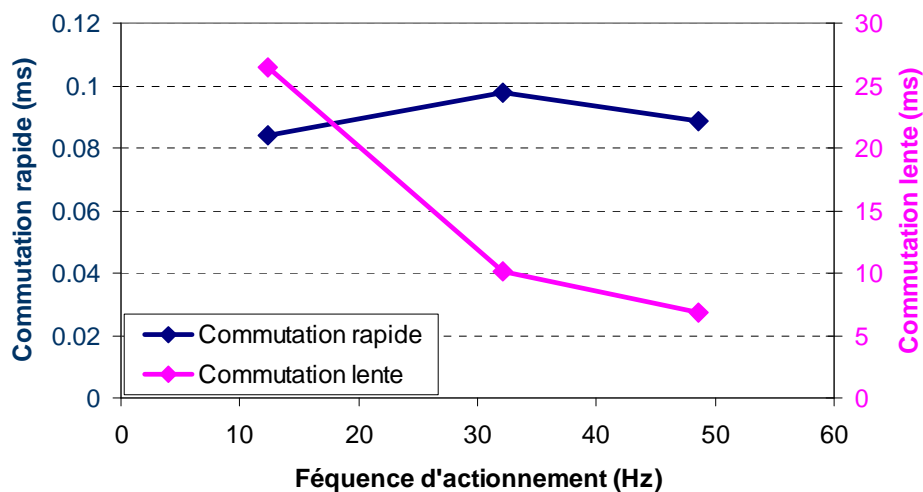


Figure 162. Mesure des temps de commutation du micro-interrupteur.

Ces mesures au vibromètre laser nous ont permis de mettre en évidence l'existence de deux modes de commutation : un mode proportionnel à la fréquence de commutation et un mode indépendant. Le mode d'utilisation préférable est le mode indépendant de la fréquence d'actionnement, et c'est ce mode qui a été utilisé tout au long de ces travaux de thèse.

Une commutation dans le mode d'actionnement proportionnel à la fréquence de commutation (« lent ») nécessite plusieurs millisecondes. Une commutation dans le mode indépendant de la fréquence d'actionnement (« rapide ») nécessite environ 90 μs .

Nous avons aussi pu mesurer la vitesse de commutation de la membrane, qui est de l'ordre de 20 mm/s. Une telle valeur est faible, comparée aux vitesses de déplacement des dispositifs macroscopiques : 10 m/s pour un disjoncteur et 0.1 à 1 m/s pour un contacteur électromagnétique.

Annexe 2 – Calcul de la force de contact dans le micro-interrupteur

(Laurent Chiesi, Schneider Electric)

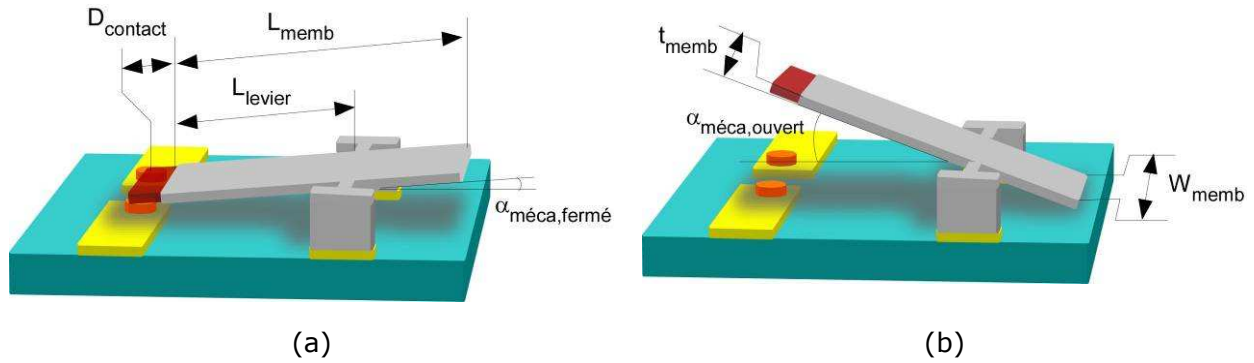


Figure 163. Système considéré.
(a) En position fermée et (b) en position ouverte.

1. Perméabilité apparente

L'induction magnétique d'un noyau ferromagnétique (B_{noyau}) placé dans un champ magnétique H_{ext} est donnée par:

$$B_{noyau} = \mu_0 \cdot (H_{noyau} + M) \quad \text{où} \quad \begin{cases} H_{noyau} = \text{champ magnétique interne du noyau} \\ M = \text{aimantation du noyau} \end{cases} \quad \text{éq. 1}$$

On écrit alors :

$$B_{noyau} = \mu_0 \cdot (H_{noyau} + \chi \cdot H_{noyau}) = \mu_0 \cdot H_{noyau} \cdot (1 + \chi) \quad \text{où} \quad \chi = \text{susceptibilité du noyau} , \quad \text{éq. 2}$$

soit :

$$B_{noyau} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H_{noyau} \quad \text{avec la perméabilité relative du noyau ferromagnétique } \mu_r = 1 + \chi . \quad \text{éq. 3}$$

De plus, on a :

$$H_{noyau} = H_{ext} - D \cdot M \quad \text{avec } D = \text{coefficient de démagnétisation} \quad (0 \leq D \leq 1), \quad \text{éq. 4}$$

d'où :

$$H_{noyau} = H_{ext} - D \cdot \chi \cdot H_{noyau} , \quad \text{éq. 5}$$

soit:

$$H_{noyau} = \frac{H_{ext}}{1 + D \cdot \chi} . \quad \text{éq. 6}$$

On peut alors écrire :

$$B_{noyau} = \mu_0 \cdot \frac{\mu_r}{1 + D \cdot \chi} \cdot H_{ext} , \quad \text{éq. 7}$$

soit :

$$B_{noyau} = \mu_0 \cdot \frac{\mu_r}{1 + D \cdot (\chi + 1 - 1)} \cdot H_{ext} , \quad \text{éq. 8}$$

ce qui donne:

$$B_{noyau} = \mu_0 \cdot \frac{\mu_r}{1 + D \cdot (\mu_r - 1)} \cdot H_{ext} . \quad \text{éq. 9}$$

d'où :

$$\boxed{B_{noyau} = \mu_0 \cdot \mu_{app} \cdot H_{ext}} . \quad \text{éq. 10}$$

avec la perméabilité apparente du noyau μ_{app} qui est définie par:

$$\boxed{\mu_{app} = \frac{\mu_r}{1 + D \cdot (\mu_r - 1)}} . \quad \text{éq. 11}$$

Comme $\mu_r \gg 1$, en régime de démagnétisation on vérifie généralement: $D \cdot \mu_r \gg 1$, on peut alors exprimer la perméabilité apparente par:

$$\boxed{\mu_{app} = \frac{1}{D}} . \quad \text{éq. 12}$$

Il est donc intéressant de noter que l'on peut exprimer l'induction magnétique dans un noyau B_{noyau} en fonction du champ extérieur appliqué et de la perméabilité apparente μ_{app} de ce noyau.

Cette perméabilité apparente dépend du coefficient de démagnétisation D qui dépend lui-même de la géométrie du noyau.

Pour un noyau de la forme d'une membrane, ce coefficient de démagnétisation D étant différent selon les axes de la membrane, la perméabilité apparente n'est donc pas isotrope dans le matériau. Cette perméabilité apparente sera beaucoup plus importante dans le plan de la membrane ($D \rightarrow 0$) que selon l'axe perpendiculaire au plan de la membrane ($D \rightarrow 1$).

Le calcul théorique des coefficients de démagnétisation D selon les axes d'un noyau est fastidieux et complexe. Il est de plus limité à des formes géométriques ellipsoïdales. Les expressions analytiques obtenues sont, elles aussi, assez complexes à manipuler.

Dans le cas d'un noyau ferromagnétique de la forme de la membrane et dont les dimensions respectent les conditions suivantes (Figure 163):

$$t_{memb} \ll L_{memb} \quad \text{et} \quad t_{memb} \ll W_{memb}$$

$$L_{memb} \approx W_{memb}$$

les coefficients de démagnétisation dans le plan de la membrane $D_{x,y}$ et perpendiculaire à son plan D_z peuvent alors s'exprimer simplement par:

$$\begin{cases} D_{x,y} = \frac{t_{memb}}{t_{memb} + L_{memb}} \\ D_z \approx 1 \end{cases} . \quad \text{éq. 13}$$

On obtient donc pour les perméabilités apparentes:

$$\begin{cases} \mu_{app,xy} = \frac{t_{memb} + L_{memb}}{t_{memb}} \\ \mu_{app,z} \approx 1 \end{cases} . \quad \text{éq. 14}$$

En effet, un noyau ferromagnétique placé dans un champ magnétique capture une partie de ces lignes qui se concentrent alors dans le noyau (Figure 164).

Une hypothèse simplificatrice consiste à considérer que les lignes de champ magnétique déviées dans le noyau ne parcourent pas une distance dans l'air supérieure à la dimension du noyau dans l'axe de ces lignes de champ.

Pour un noyau de longueur L et d'épaisseur t placé dans des lignes de champ magnétique parallèles à l'axe longitudinal du noyau, ces lignes de champ sont capturées sur une hauteur $(L+t)$ dans le plan perpendiculaire au plan du noyau.

On peut alors estimer la perméabilité apparente $\mu_{app,xy}$ dans le plan du noyau comme le facteur de concentration des lignes de champ, à savoir:

$$\mu_{app,xy} = \frac{t+L}{t} . \quad \text{éq. 15}$$

En suivant le même raisonnement, on peut calculer la perméabilité apparente $\mu_{app,z}$ dans l'axe orthogonal au plan du noyau par:

$$\mu_{app,z} = \frac{t+L}{L} \approx 1 . \quad \text{éq. 16}$$

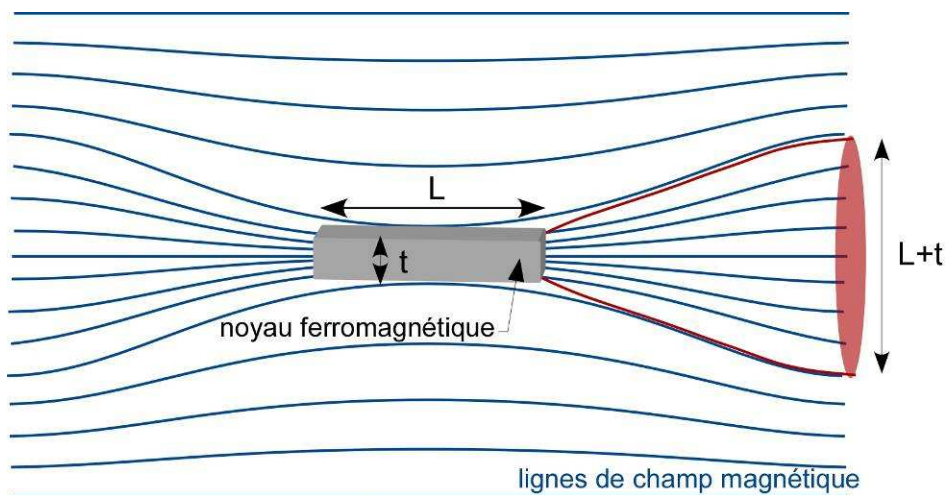


Figure 164. Considérations géométriques pour déterminer la surface de capture des lignes de champ magnétique dans un noyau de longueur L et d'épaisseur t .

2. Moment magnétique de la membrane

En considérant une induction magnétique B_{memb} uniforme dans la membrane placée dans un champ magnétique uniforme B_{aimant} (Figure 165), on peut exprimer le moment magnétique m de la membrane par :

$$m = \frac{B_{memb}}{\mu_0} \cdot V_{memb} \quad \text{éq. 17}$$

avec V_{memb} = volume de la membrane.

A partir des perméabilités apparentes selon les axes de la membrane, on peut alors exprimer les différentes composantes l'induction magnétique B_{memb} par :

$$\begin{cases} B_{memb,x} = \mu_{app,x} \cdot B_{aimant,x} \\ B_{memb,y} = \mu_{app,y} \cdot B_{aimant,y} \\ B_{memb,z} = \mu_{app,z} \cdot B_{aimant,z} \end{cases} \quad \text{éq. 18}$$

Dans l'étude qui nous concerne, la projection du champ magnétique extérieur B_{aimant} selon l'axe x de la membrane est nulle.

On obtient alors :

$$\begin{cases} B_{memb,x} = 0 \\ B_{memb,y} = \mu_{app,y} \cdot B_{aimant} \cdot \sin \alpha_{mag} \\ B_{memb,z} = \mu_{app,z} \cdot B_{aimant} \cdot \cos \alpha_{mag} \end{cases} \quad \text{éq. 19}$$

Donc, les composantes du moment magnétique de la membrane sont :

$$\begin{cases} m_x = 0 \\ m_y = \frac{\mu_{app,y} \cdot B_{aimant} \cdot \sin \alpha}{\mu_0} \cdot V_{memb} \\ m_z = \frac{\mu_{app,z} \cdot B_{aimant} \cdot \cos \alpha}{\mu_0} \cdot V_{memb} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} m_x = 0 \\ m_y \approx \frac{(t_{memb} + L_{memb}) \cdot L_{memb} \cdot W_{memb}}{\mu_0} \cdot B_{aimant} \cdot \sin \alpha \\ m_z \approx \frac{L_{memb} \cdot W_{memb} \cdot t_{memb}}{\mu_0} \cdot B_{aimant} \cdot \cos \alpha \end{cases} \quad \text{éq. 20}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} m_x = 0 \\ m_y \approx \frac{L_{memb}^2 \cdot W_{memb}}{\mu_0} \cdot B_{aimant} \cdot \sin \alpha \\ m_z \approx \frac{L_{memb} \cdot W_{memb} \cdot t_{memb}}{\mu_0} \cdot B_{aimant} \cdot \cos \alpha \end{cases} \quad \text{éq. 21}$$

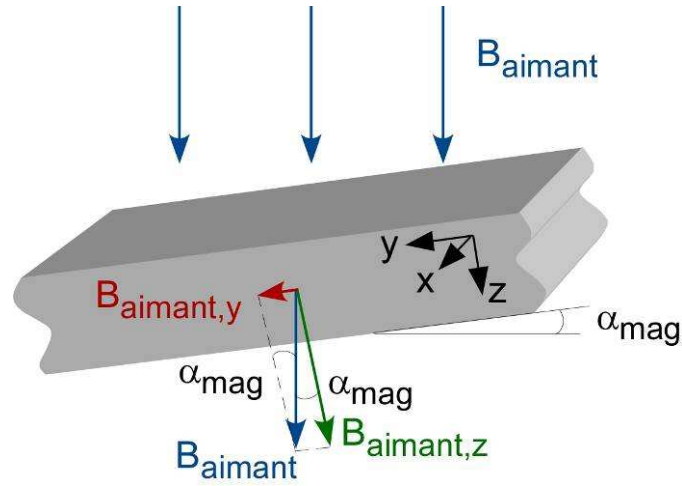


Figure 165. Projections du champ magnétique extérieur B_{aimant} dans la membrane.

3. Calcul du couple magnétique dans la membrane

Le couple magnétique Γ_{mag} exercé sur la membrane placée dans un champ magnétique B_{aimant} s'exprime par :

$$\boxed{\vec{\Gamma}_{mag} = \vec{m} \wedge \vec{B}_{aimant}}$$
 éq. 22

soit :

$$\vec{\Gamma}_{mag} = \begin{vmatrix} m_x & B_{aimant,x} \\ m_y & B_{aimant,y} \\ m_z & B_{aimant,z} \end{vmatrix} = (m_y \cdot B_{aimant,z} - m_z \cdot B_{aimant,y}) \cdot \vec{x} + (m_z \cdot B_{aimant,x} - m_x \cdot B_{aimant,z}) \cdot \vec{y} + (m_x \cdot B_{aimant,y} - m_y \cdot B_{aimant,x}) \cdot \vec{z}.$$
 éq. 23

D'où :

$$\vec{\Gamma}_{mag} = (m_y \cdot B_{aimant,z} - m_z \cdot B_{aimant,y}) \cdot \vec{x},$$
 éq. 24

donc la membrane tourne autour de l'axe x et le couple exercé est:

$$\Gamma_{mag,x} \approx (L_{memb}^2 \cdot W_{memb} - L_{memb} \cdot W_{memb} \cdot t_{memb}) \left(\frac{B_{aimant}^2 \cdot \cos \alpha_{mag} \cdot \sin \alpha_{mag}}{\mu_0} \right),$$
 éq. 25

soit :

$$\boxed{\Gamma_{mag,x} \approx \frac{L_{memb}^2 \cdot W_{memb}}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_{aimant}^2 \cdot \sin(2 \cdot \alpha_{mag})}.$$
 éq. 26

4. Calcul de la force de contact

Nous avons donc :

$$\Gamma_{mag,x} \approx \frac{L_{memb}^2 \cdot W_{memb}}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_{aimant}^2 \cdot \sin(2 \cdot \alpha)$$

Avec L_{memb} la longueur totale de la membrane (800µm), W_{memb} sa largeur (800µm), μ_0 la perméabilité du vide et α l'angle entre le champ magnétique de l'aimant s'exerçant au niveau de l'axe de rotation et la verticale. Le champ de l'aimant B_{aimant} peut quant à lui être calculé en tout point en connaissant ses dimensions et sa position par rapport à la membrane. La force de contact exercée à l'extrémité de la membrane est alors égale à :

$$F_C \approx \frac{\Gamma_{mag,x} - \Gamma_{méca}}{d_{bras_levier}}$$

Avec $\Gamma_{méca}$ le couple de rappel des bras de torsion (0.017 µN.m dans notre cas) et d_{bras_levier} la distance entre les bras et l'extrémité de la membrane (le bras de levier, 465µm dans notre cas). Il est important de noter que notre micro-interrupteur possède deux contacts, la force de contact totale doit donc être divisée par deux pour connaître la force par contact.

Résumé

Français : Le but de cette thèse est l'amélioration, en termes de performances et de fiabilité, du contact électrique d'un micro-interrupteur en technologie MEMS. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'une collaboration entre la Direction de l'Innovation de Schneider Electric et le Département d'Intégration Hétérogène sur Silicium du CEA-Leti. De cette collaboration a résulté un micro-interrupteur MEMS dont la fiabilité est supérieure à l'état de l'art mondial. Sa durée de vie est cependant limitée par la dégradation de son contact électrique.

La première partie de cette thèse a ainsi porté sur l'étude des mécanismes à l'origine des défaillances de ce contact. Les essais d'endurance électrique avec courant coupé (« hot switching ») réalisés directement sur les prototypes de micro-interrupteurs, couplés à des analyses physico-chimiques et électriques ont permis d'identifier cinq mécanismes de défaillance principaux, différant en fonction du matériau de contact utilisé et du calibre de test.

La seconde partie de la thèse présente le développement d'un banc permettant d'évaluer l'endurance de nouveaux matériaux de contact en remplacement de l'or et du ruthénium utilisés dans le micro-interrupteur. Ce banc d'endurance a été intégralement développé, réalisé et testé durant la thèse. Il reproduit le fonctionnement d'un micro-contact électrique et permet de réaliser plusieurs millions de cycles de fermeture/ouverture en faisant varier de nombreuses conditions de test telles que l'atmosphère environnante.

La troisième partie de ce travail porte sur l'étude des mécanismes d'établissement et d'interruption du courant lorsque l'espace inter-contacts est réduit à quelques dizaines de nanomètres. L'utilisation non conventionnelle d'un microscope à force atomique à pointe conductrice en mode approche-retrait a permis de simuler à vitesse réduite l'actionnement d'un micro-contact. Cette étude a mis en évidence un phénomène d'émission électronique Fowler-Nordheim lors des derniers instants précédant la fermeture du contact. Les conséquences de cette émission électronique sont une dégradation des matériaux de contact, aboutissant à un transfert du matériau de contact de l'anode vers la cathode.

L'ensemble de ces travaux est alors utilisé dans le chapitre de conclusion pour définir les règles de conception d'un micro-contact fiable.

Mots-clés : micro-interrupteur, relais MEMS, micro-contact électrique, fiabilité.

English: The objective of this work is to increase the reliability of a MEMS switch developed by Schneider Electric in collaboration with the CEA-Leti. The actual lifetime of the switch is higher than the state of the art but is limited by the degradation of its electrical contact. The first part of this thesis deals with the analysis of the failure modes encountered during hot switching testing of the devices. Five main mechanisms have been highlighted and depend on the contact material used (Ru or Au) and the test voltage/current. The second part of the work presents the development of an original setup dedicated to evaluate the endurance of new contact materials. The setup has been fully developed, built and tested during this PhD work and is able to perform millions of cycles while varying many test conditions. The third part of this thesis focuses on the study of the very last step before closure of a micro-contact, thanks to a modified AFM. Fowler-Nordheim electronic emission has been underlined when contacts are separated from only a few tens of nanometers. This electronic emission leads to the damage of the contact materials and a net material transfer from anode to cathode has been revealed. Finally, the results of this work are used to establish a conception guidebook for highly reliable microswitches, which the next generation of devices will benefit from.

Keywords: MEMS switch, MEMS relay, electrical micro-contact, reliability.